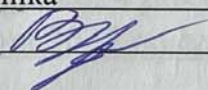


Вінницький національний технічний університет
Факультет інформаційних електронних систем
Кафедра інфокомунікаційних систем і технологій

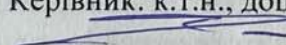
Бакалаврська дипломна робота на тему:

ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЇ WDM НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ

Виконав: студент 4-го курсу, групи ПЗТ-206
спеціальності 172 – Телекомунікації та
радіотехніка

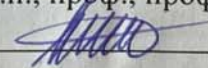
 Вікулов М. М.

Керівник: к.т.н., доц., професор каф. ІКСТ

 Барась С. Т.

« 11 » 06 2024 р.

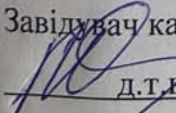
Рецензент: д.т.н., проф., професор каф. ІРТС

 Семенов А.О.

« 11 » 06 2024 р.

Допущено до захисту

Завідувач кафедри ІКСТ

 д.т.н., проф. Кичак В.М.

« 12 » червня 2024 р.

Вінниця ВНТУ - 2024 рік

Вінницький національний технічний університет
Факультет інформаційних електронних систем
Кафедра інфокомунікаційних систем та технологій
Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)
Галузь знань 17 – Електроніка та телекомунікації
(шифр і назва)
Спеціальність 172 – Телекомунікації та радіотехніка
(шифр і назва)
Освітня програма – Програмне забезпечення телекомунікаційних систем

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ІКСТ

д.т.н., професор В.М. Кичак

«15» березня 2024 року

ЗАВДАННЯ НА БАКАЛАВРСЬКУ ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Вікулову Миколі Миколайовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Вплив технології WDM на ефективність передачі даних
керівник роботи Барась Святослав Тадіонович, канд. техн. наук, професор,

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом ВНТУ від “11” березня 2024 року № 80

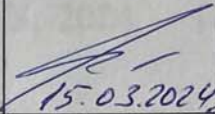
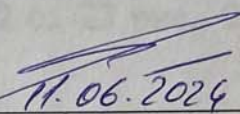
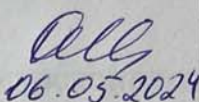
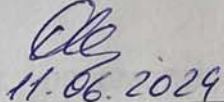
2. Строк подання студентом роботи: 07 червня 2024 року

3. Вихідні дані до роботи: щільне (міжканальні інтервали 1.6 нм, 0.8 нм, 0.4 нм та 0.2 нм - DWDM) та грубе (міжканальні інтервали не менше 20 нм - CWDM) хвильове мультиплексування, діапазон хвиль для технології DWDM від 1525 до 1565 нм, швидкість передачі інформації не менше 40 Гбіт/с, дані для розрахунку одномодового оптичного волокна: довжина хвилі 1550 нм, показник заломлення серцевини 1,4469, світловідбивної оболонки – 1,4396.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки роботи (перелік питань, які потрібно розробити): вступ, порівняльний аналіз технологій TDM та WDM, основні компоненти системи WDM, розрахунок параметрів лінійного тракту з використанням технології WDM, методи підвищення ефективності WDM-систем, гнучкість та масштабованість сучасних оптичних систем, охорона праці.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): Принцип роботи WDM; ілюстрація робочих діапазонів технологій CWDM та DWDM; порівняльні характеристики технологій CWDM та DWDM; структурна схема ВОСП з WDM; принцип роботи реконфігурованого мультиплексора введення-виведення (ROADM); діаграма шляхів підвищення швидкості передачі даних; структура когерентного приймача.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Спеціальна частина	Барась С. Т., професор кафедри ІКСТ	 15.03.2024	 11.06.2024
Охорона праці	Дембичук С. В. проф. кафедри ПБ	 06.05.2024	 11.06.2024

7. Дата видачі завдання «06» травня 2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

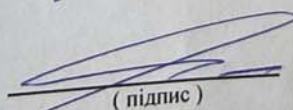
№ з/п	Назва етапів бакалаврської дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Формування та затвердження теми та індивідуального завдання бакалаврської дипломної роботи (БДР)	06.05.2024р.	
2	Виконання спеціальної частини БДР. Перший рубіжний контроль виконання БДР	20.05.2024р.	
3	Виконання спеціальної частини БДР. Другий рубіжний контроль виконання БДР	31.05.2024р.	
4	Виконання розділу «Охорона праці»	04.06.2024р.	
5	Нормоконтроль БДР	05.06.2024р.	
6	Попередній захист БДР	06.06.2024р.	
7	Рецензування БДР	07.06.2024р.	
8	Захист БДР	12.06.2024р.	

Студент


(підпис)

Вікулов М. М.

Керівник роботи


(підпис)

Барась С. Т.

АНОТАЦІЯ

Вплив технології WDM на ефективність передачі даних. Бакалаврська дипломна робота / М. М. Вікулов – Вінниця: ВНТУ, 2024. – 102 с., 23 рис., 9 табл., 23 дж. – українською мовою.

Метою роботи є визначення напрямків удосконалення параметрів найбільш критичних вузлів WDM-систем та алгоритмів функціонування для підвищення ефективності передачі даних. Виконано порівняння характеристик оптичних систем з часовим та хвильовим мультиплексуванням. Проаналізовано особливості побудови систем зі щільним та грубим розділенням довжин хвиль в оптичному волокні DWDM та CWDM. Проведені розрахунки параметрів лінійного тракту з використанням технології WDM. Визначені напрямки удосконалення компонентів WDM-систем та причини виникнення помилок при прийомі оптичного сигналу, запропоновані методи підвищення продуктивності як інтегрального поняття, що поєднує у собі швидкість та дальність передачі. Проаналізована гнучкість та масштабованість сучасних оптичних систем, можливі формати модуляції та програмно-керовані мережі.

Виконано розділ з охорони праці та безпеки життєдіяльності.

ABSTRACT

Impact of WDM technology on data transmission efficiency. Bachelor thesis / M. M. Vikulov – Vinnytsia: VNTU, 2024. – 102 p., 23 fig., 9 tabl., 23 s. - In ukrainian.

The purpose of the work is to determine directions for improving the parameters of the most critical nodes of WDM systems and functioning algorithms to increase the efficiency of data transmission. The characteristics of optical systems with time and wave multiplexing were compared. The features of building systems with dense and coarse separation of wavelengths in DWDM and CWDM optical fibers are analyzed. The parameters of the linear path were calculated using WDM technology. The areas of improvement of the WDM system components and the causes of errors in optical signal reception are defined, methods of increasing productivity as an integral concept combining speed and transmission range are proposed. The flexibility and scalability of modern optical systems, possible modulation formats and software-controlled networks are analyzed.

The section on labor protection and life safety has been completed.

.

ЗМІСТ

	ВСТУП	4
1	ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ TDM ТА WDM	8
1.1	Огляд варіантів лінійних трактів ВОСП	8
1.1.1	Однохвильовий лінійний тракт	8
1.1.2	Багатохвильовий лінійний тракт	10
1.2	Оцінка проблематики підвищення пропускної спроможності ВОСП	13
1.3	Часове мультиплексування цифрових потоків	14
1.4	Хвильове мультиплексування WDM	18
1.4.1	Основні компоненти системи WDM	18
1.4.2	Переваги і проблеми технології WDM	21
1.4.3	Порівняння технологій CWDM та DWDM	23
1.5	Порівняльні характеристики TDM та WDM.....	27
1.6	Висновки до розділу	29
2	РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ЛІНІЙНОГО ТРАКТУ З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕХНОЛОГІЇ WDM	31
2.1	Побудова ОЛТ ВОСП з WDM	31
2.2	Вибір джерела випромінювання та фотоприймача	33
2.3	Розрахунок параметрів багатомодового оптичного волокна зі ступінчатим профілем показника заломлення	37
2.4	Розрахунок параметрів багатомодового градієнтного волокна.....	39
2.5	Розрахунок параметрів одномодового оптичного волокна	42
2.6	Розрахунок довжини регенераційної ділянки з урахуванням згасання	45
2.7	Розрахунок довжини регенераційної ділянки з урахуванням дисперсії	46
2.8	Висновки до розділу	47
3	МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ WDM-СИСТЕМ	50
3.1	Напрямки удосконалення компонентів WDM-системи	51
3.2	Причини виникнення помилок в системах WDM при прийомі оптичного сигналу	57

3.3	Методи підвищення продуктивності WDM-систем	59
3.3.1	Збільшення швидкості передачі в системі	61
3.3.2	Збільшення дальності передачі	64
3.4	Гнучкість та масштабованість сучасних оптичних систем	67
3.4.1	Формати модуляції. Суперканали	67
3.4.2	Комутація на фотонному рівні	68
3.4.3	Комутація на електронному рівні	69
3.4.4	Програмно-керовані мережі	70
3.5	Висновки до розділу	71
4	ОХОРОНА ПРАЦІ	73
4.1	Технічні рішення щодо безпечного виконання роботи.....	73
4.2	Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії.....	75
4.2.1	Мікроклімат	75
4.2.2	Склад повітря робочої зони	76
4.2.3	Виробниче освітлення.....	77
4.2.4	Виробничий шум	78
4.2.5	Виробничі випромінювання.....	79
4.3	Пожежна безпека.....	80
4.3.1	Технічні рішення системи запобігання пожежі.....	80
4.3.2	Технічні рішення системи протипожежного захисту.....	81
4.4	Висновки до розділу	82
	ВИСНОВКИ.....	83
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	86
	Додаток А (обов'язковий) - Ілюстративний матеріал	89
	Додаток Б – Протокол перевірки кваліфікаційної роботи на наявність текстових запозичень	97

ВСТУП

Актуальність теми. Зростання обсягу переданих даних поступово призвело до вичерпання пропускної спроможності існуючого оптичного волокна, з усією гостротою поставивши питання її збільшення. Його можна вирішити трьома способами [1-4]: прокласти новий кабель, перейти до більш продуктивної апаратури часового мультиплексування або застосувати WDM.

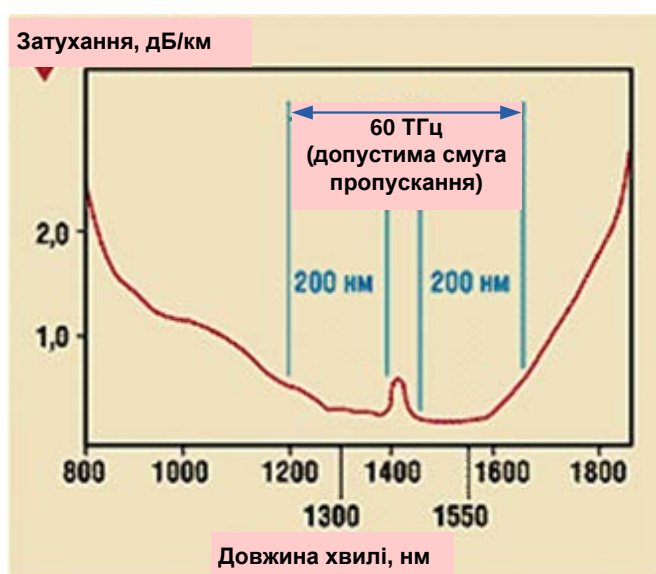
Недоліки першого сценарію є очевидними. Реалізація другого варіанта в мережах телекомунікації SONET/SDH теж пов'язана з низкою труднощів. Донедавна у таких мережах найшвидшим був канал OC-48/STM-16 (швидкість передачі 2,4 Гбіт/с). Потім почалося впровадження апаратури рівня OC-192/STM-64, що забезпечує продуктивність 10 Гбіт/с, проте прокладене волокно спочатку не було розраховане на такі високі швидкості передачі.

По-перше, при таких швидкостях істотну роль починають відігравати відбиті сигнали від місць з'єднання кабелів і поляризаційна модова дисперсія, викликана відхиленням поперечного перерізу волокна від кругової форми. Для компенсації дисперсії прокладаються відрізки волоконно-оптичного кабелю з дисперсією протилежного знаку. По-друге, зі зростанням швидкості передачі посилюється згасання (розсіювання) світлового потоку і погіршується чутливість фотоприймача, тобто збільшується мінімальна потужність вхідного сигналу, при якій частота появи помилок (BER) відповідає установленому значенню. Щоб забезпечити достатню потужність сигналу, що приймається, доводиться встановлювати додаткові підсилювачі і регенератори [3-5].

Таким чином, плануючи перехід до каналних швидкостей 10 Гбіт/с і більше, необхідно проаналізувати обмеження, зумовлені спотвореннями сигналу у волокні та технічними можливостями апаратури. Є сумніви у тому, що найближчими роками часове мультиплексування (наприклад, SONET/SDH) зможе на практиці перевершити рівень 10 Гбіт/с [4].

Третій варіант – технологія WDM, що дозволяє помітно підвищити ефективність використання сумарної пропускної спроможності оптичного волокна.

Нагадаємо, що звичайне оптичне волокно має три вікна прозорості в інфрачервоній ділянці; їх центральні довжини хвиль дорівнюють 850, 1300 та 1550 нм. Для передачі на великі відстані використовуються лише діапазони 1300 і 1550 нм, які характеризуються мінімальним згасанням сигналів. Ширина кожного з цих двох діапазонів становить 200 нм, що в сумі приблизно еквівалентно частотного інтервалу 60 ТГц.



Оцінюючи пропускну здатність волоконно-оптичного каналу зазвичай приймають, що для кожного 1 Гбіт/с потрібно 2 ТГц смуги пропускання. При такому підході 60 ТГц стають еквівалентними пропускній здатності 30 Тбіт/с, проте не враховуються обмеження приймально-передавальної апаратури, яка формує канал передачі даних. Якщо час спрацьовування фотоприймача дорівнює 1 нс, то швидкість передачі трафіку по каналу не перевищить 1 Гбіт/с, якою б широкою не була смуга пропускання волокна. Пропускна здатність каналу визначається такими характеристиками приймально-передавальних пристроїв, як максимально досяжна швидкість модуляції передавача та здатність фотоприймача швидко та точно розпізнавати біти даних.

Сьогодні швидкість передачі каналом телекомунікації, на яку може становить 10 Гбіт/с. Це означає, що з 60 ТГц потенційної смуги пропускання каналу практично використовується трохи більше 20 ТГц. Якщо ж розділити загальну смугу пропускання на безліч частотних каналів, швидкість передачі кожного з яких збережеться на колишньому рівні, то обсяг даних, що передаються волокном в одиницю часу, збільшиться. Саме цей підхід реалізований у технології WDM [3-5]. Розгляд проблематики побудови та методів підвищення ефективності таких систем є актуальним.

Аналіз останніх досліджень. Тривалий час у WDM-системах використовувалися 2-4 канали, які були віддалені один від одного на десятки та сотні нанометрів. Тим часом ще з середини 80-х років розробники намагалися радикально збільшити цей параметр. Поява технології DWDM дозволила формувати в одному волокні десятки каналів та вести передачу із сумарною швидкістю понад 1 Тбіт/с.

Головна перевага технології WDM полягає в тому, що вона дозволяє подолати обмеження на пропускну здатність каналу та суттєво збільшити швидкість передачі даних. Причому використовуються вже прокладений кабель та стандартна апаратура часового мультиплексування, а збільшувати швидкість передачі окремим каналом до 10 Гбіт/с і вище не потрібно.

Важливо, що в мережах SONET/SDH з'явилася можливість вибирати для окремого каналу значення швидкості (рівень ієрархії), що не залежить від швидкості в інших каналах. Нарешті, поширенню WDM сприяють останні технологічні досягнення: створення вузькосмугових напівпровідникових лазерів, що мають ширину спектра випромінювання менше 0,1 нм, оптичних підсилювачів і оптичних фільтрів для поділу близьких каналів [5].

Сучасні розробки систем WDM спрямовані на збільшення пропускну здатності, зниження втрат сигналу, збільшення дальності передачі, підвищення ефективності і надійності роботи. Так, дослідження в галузі лазерних технологій дозволяють створювати більш потужні, стабільні та компактні джерела світла. Це сприяє збільшенню пропускну здатності та

дальності передачі систем WDM. Розвиток оптичних компонентів та технологій виготовлення дозволяє створювати більш ефективні мультиплексори та демультимплексори з меншими втратами та міжканальними завадами. Нові матеріали та конструкції оптичних підсилювачів дозволяють збільшити підсилення сигналу та знизити рівень шуму, що підвищує якість та дальність передачі даних [5, 6].

Мета та постановка задачі. Метою даної роботи є визначення напрямків удосконалення параметрів найбільш критичних вузлів WDM-систем та алгоритмів функціонування для підвищення ефективності передачі даних.

Задачами бакалаврської дипломної роботи є:

- загальний огляд технологій TDM і WDM та їх порівняння;
- розрахунок параметрів лінійного тракту з використанням технології WDM;
- аналіз напрямків удосконалення компонентів WDM-систем;
- аналіз методів підвищення продуктивності WDM-систем;
- оцінка гнучкості та масштабованості сучасних оптичних систем;
- розробка заходів з охорони праці та безпеки життєдіяльності.

Об'єкт дослідження - це процеси формування, передачі, прийому та обробки оптичних сигналів у ВОСП.

Предмет дослідження - це методи та засоби, які забезпечують формування та перетворення оптичних сигналів.

Практичне значення. Практичне значення роботи полягає у використанні її результатів для забезпечення високих показників телекомунікаційних пристроїв та в навчальному процесі в дисципліні «Сигнали та широкосмугові технології в телекомунікаціях».

1 ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ TDM ТА WDM

1.1 Огляд варіантів лінійних трактів ВОСП

Одноволоконні лінійні тракти волоконно-оптичних систем передачі (ВОСП) можуть бути побудовані за схемою однохвильової або багатохвильової передачі. При цьому системний дуплекс забезпечується двоволоконною схемою – окреме волокно на кожен напрямок.

1.1.1 Однохвильовий лінійний тракт

Можливі схеми лінійного тракту з використанням однієї довжини хвилі показані на рисунках 1.1 – 1.4 [1-2].

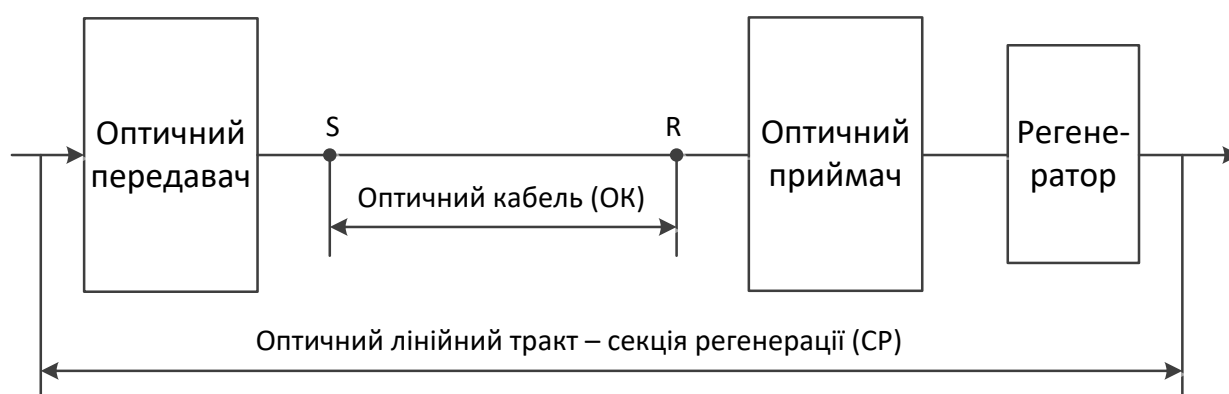


Рисунок 1.1 – Простий оптичний лінійний тракт

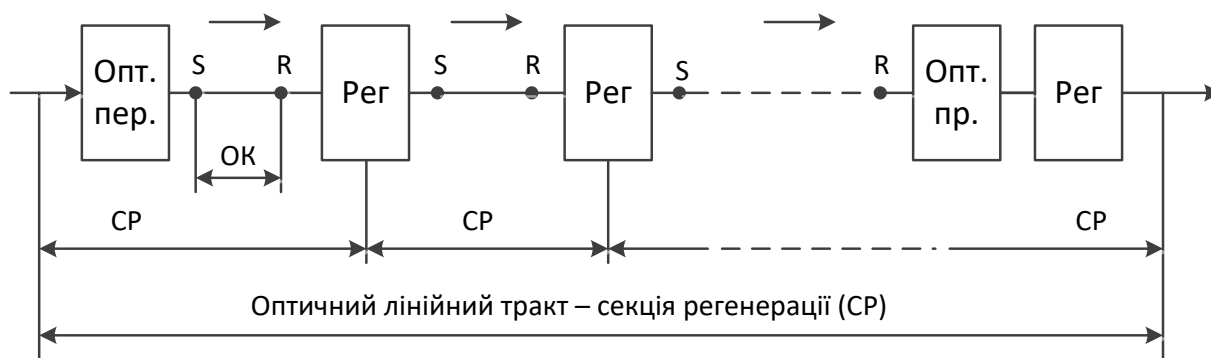


Рисунок 1.2 – Лінійний оптичний тракт з електронними регенераціями

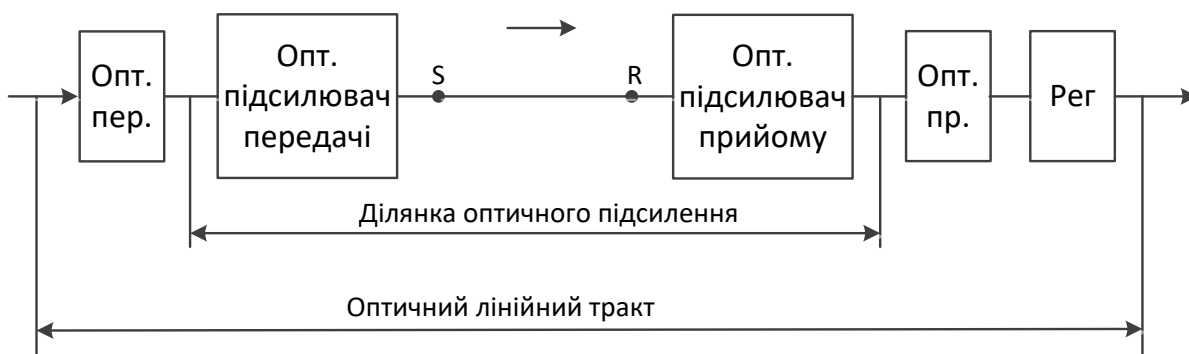


Рисунок 1.3 – Лінійний оптичний тракт з оптичними підсилювачами передачі і прийому

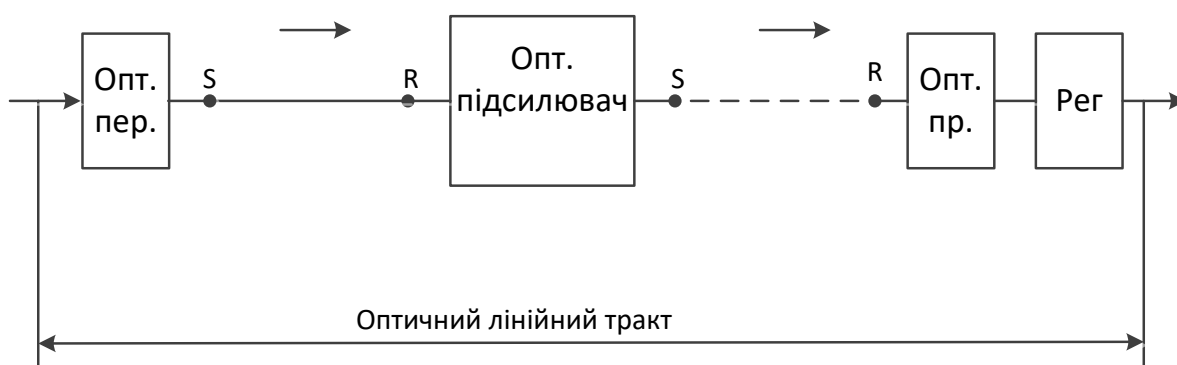


Рисунок 1.4 – Лінійний оптичний тракт з проміжними оптичними підсилювачами

Позначені на схемах точки S і R означають відповідно передачу і прийом. Відстань між цими точками на лінії залежить від характеристик оптичного волокна (дисперсії та загасання), передавача і приймача (потужність передачі, ширина спектру випромінювання, чутливість приймача тощо). До складу лінійного оптичного тракту, крім зазначених на схемах пристроїв, можуть входити: проміжні та кінцеві оптичні підсилювачі, проміжні регенератори, перетворювачі лінійного коду передачі і прийому, компенсатори дисперсії, роз'ємні і нероз'ємні з'єднувачі. Таким чином, різні характеристики передавачів і приймачів впливають на відповідні довжини ділянок передачі (ділянок регенерації) при необхідній якості. Проміжне обладнання може бути розміщене на трасі поширення сигналу у зручних місцях (на території, що охороняється, з гарантованим енергозабезпеченням, з можливим обслуговуванням).

1.1.2 Багатохвильовий лінійний тракт

Схема багатохвильового лінійного тракту має складнішу структуру, ніж попередня, однохвильова. Термін «багатохвильовий» означає, що в одному оптичному волокні одночасно передається певна кількість оптичних сигналів на різних частотах (різних довжинах хвиль). За таких умов стає очевидною більша складність такої схеми – необхідні методи та засоби для зменшення взаємних завад у хвильових каналах, які паралельно працюють і взаємодіють між собою. Міжканальні завади з'являються через низку нелінійних оптичних ефектів, що виникають у волоконних світловодах при певній щільності потужності оптичного випромінювання в довгій лінії.

Рекомендаціями Міжнародного Союзу Електрозв'язку (G.692) визначено три типи організації лінійних трактів багатохвильових ВОСП з оптичними підсилювачами [3]:

- L (тип 1), протяжність до 80 км із загасанням 22 дБ;
- V (тип 2), протяжність до 120 км із загасанням 33 дБ;
- U (тип 3), протяжність до 160 км із загасанням 44 дБ.

Сутність індексів: L (long) - довга лінія; V (very) - дуже довга лінія; U (ultra) - наддовга лінія.

Структурні схеми ВОСП зазначених типів наведені на рисунках 1.5 – 1.7.

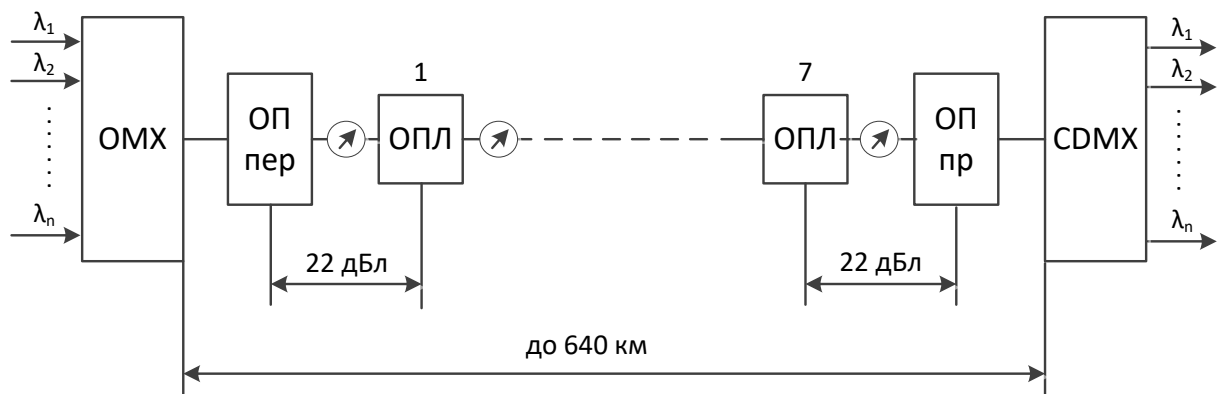


Рисунок 1.5 – Багатохвильовий лінійний оптоволоконний тракт типу L

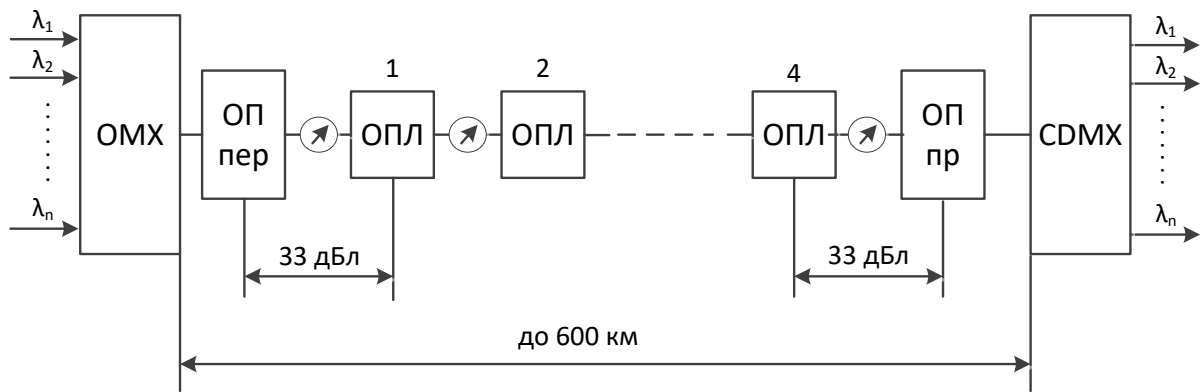


Рисунок 1.6 – Багатохвильовий лінійний оптоволоконний тракт типу V

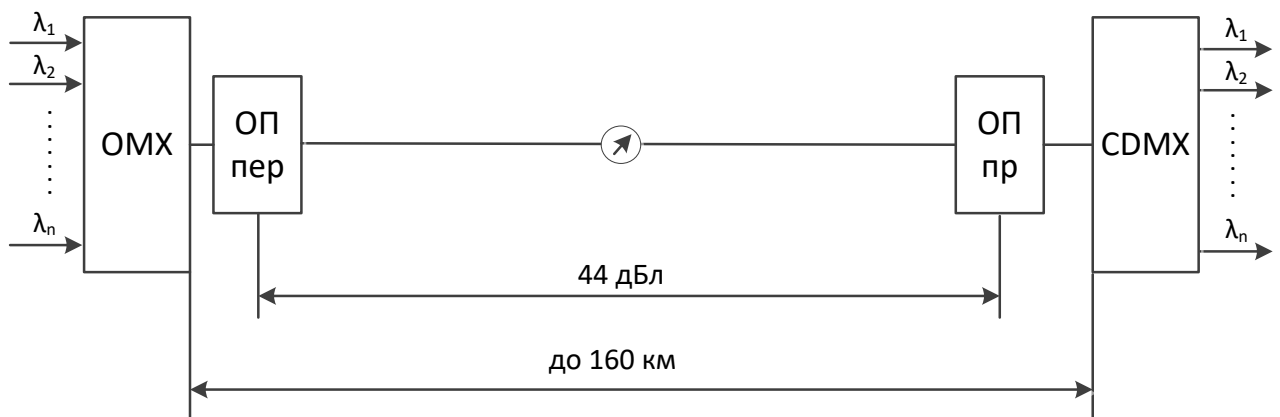


Рисунок 1.7 – Багатохвильовий лінійний оптоволоконний тракт типу U

Загальна довжина лінії типу L становить до 640 км. На ній можуть використовуватися до 7 проміжних підсилювачів, рис. 1.5. Загальна довжина лінії типу V становить до 600 км. На ній можуть використовуватися до 4 проміжних підсилювачів, рис. 1.6. У лінії типу U передача здійснюється без проміжних підсилювачів на відстань до 150 км, рис. 1.7.

Зазначені обмеження відстані багатохвильової передачі визначені для 41 спектрального каналу. Вони обумовлені як необхідністю відновлення потужності, так і регенерації сигналів в кожному хвильовому каналі. На лінії можуть застосовуватися широкосмугові компенсатори дисперсії. У такому разі довжина багатохвильового лінійного тракту може бути збільшена. Реальні розробки багатохвильових трактів містять від 4 до 320 хвильових каналів в діапазонах C, L, S [3-4].

Взагалі оптичні волокна можуть передавати оптичні сигнали з прийнятним згасанням з довжиною хвилі від 250 нм до 2000 нм. Але реальний робочий діапазон хвиль дещо менший і визначається так званими вікнами прозорості. Класифікація діапазонів хвиль [4]:

- оригінальна смуга (діапазон O): 1260 - 1360нм, згасання 0,33дБ/км;
- розширений діапазон (діапазон E): 1360 – 1460нм, згасання 0,19дБ/км;
- коротка довжина хвилі (діапазон S): 1460 – 1530нм, згасання 0,22дБ/км;
- звичайний (діапазон C): 1530 – 1565нм, згасання 0,20дБ/км;
- довгий (діапазон L): 1565 – 1625нм, згасання 0,23дБ/км;
- ультра-довгий (діапазон U): 1625 – 1675нм, згасання 0,28дБ/км.

Телекомунікаційні зразки волокон виготовляються з кварцового скла. При проходженні світла крізь скловолокно, воно ослабляється за рахунок розсіювання, поглинання матеріалу, затухання хвилеводів і режимів витікання. Важливо, щоб скло було якомога чистішим для передачі з низькими втратами.

Якщо довжина хвилі менша 250 нм, то ослаблення відбувається за рахунок поглинання і релеевського розсіювання. Сигнали з довжинами хвиль більше 2000 нм також ослабляються через інфрачервоні резонансні смуги поглинання в матеріалі. Поглинання матеріалу обумовлене механічним резонансом в кристалічній структурі кварцового скла і піками поглинання, що виникають в результаті іонів металу і ОН в склі.

При реалізації багатохвильової схеми частотний інтервал між каналами може бути: 1000 ГГц (4 канали); 600 ГГц (6 каналів); 400/500 ГГц (8 каналів); 400 ГГц (9 каналів); 200 ГГц (18 каналів); 100 ГГц (41 канал); 50 ГГц (більше 64 каналів); 25 ГГц (більше 132 каналів). Для зазначених частотних інтервалів прийнята класифікація:

- WDM (Wavelength Division Multiplexing) - хвильове мультиплексування (з поділом за довжиною хвилі);
- DWDM (Dense WDM) - щільне хвильове мультиплексування;

- HDWDM (High Dense WDM) - високощільні хвильове мультиплексування;
- CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing) - грубе (розширене) хвильове мультиплексування для каналів у різних вікнах прозорості скловолокна з інтервалом між каналами не менше 20 нм.

На рис. 1.5 – 1.7 введені позначення: λ_n - хвильовий канал; OMX - оптичний мультиплексор; ODMX - оптичний демультиплексор; ОП_{пер} - оптичний підсилювач передачі; ОП_{пр} - оптичний підсилювач прийому (передпідсилювач); ОПЛ - оптичний підсилювач лінійний.

Крім багатохвильової передачі в лінійному тракті може застосовуватися передача з оптичним часовим ущільненням (TDM) і ущільненням по поляризації (PDM). У роботі будуть розглянуті, як альтернатива, системи з TDM, а також – системи із одночасним застосуванням технології WDM та технології TDM на спектральних каналах.

1.2 Оцінка проблематики підвищення пропускної спроможності ВОСП

Мова йде про можливість підвищення пропускної спроможності ВОСП в рази. Будемо спиратись на структурну схему багатоканальної ВОСП, яка наведена на рисунку 1.8.

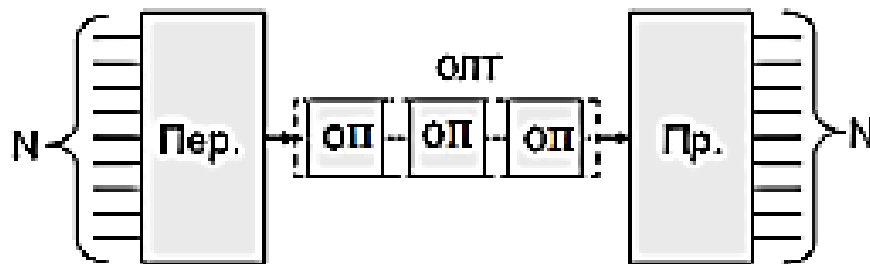


Рисунок 1.8 – Структурна схема багатоканальної ВОСП

Склад багатоканальної ВОСП: Пер. – передавач (передавальна сторона); ОЛТ – оптичний лінійний тракт; ОП – оптичні підсилювачі; Пр. – приймач

(приймальна сторона). Оптичний лінійний тракт може містити також регенератори оптичного сигналу.

Очевидні співвідношення мають місце для оптичного кабелю (ОК), який містить оптичних волокон N_{ov} (визначається конструкцією кабелю), має у кожному волокні $N_{opt.кан.}$ оптичних каналів на своїх несущих, що формуються на основі технології WDM. У кожному такому каналі реалізована гранична швидкість передачі по оптичному волокну, яка залежить від застосованого синхронного транспортного модуля STM, $V_{гран}$ [5].

$$C = V_{гран} \cdot N_{ов} \cdot N_{опт.кан.} \quad (1.1)$$

Станом на сьогодні волоконно-оптичні системи передачі використовують часове ущільнення каналів (TDM) з практичною пропускною здатністю до 2,5 Гбіт/с. Ця цифра динамічно зростає завдяки розробці та застосуванню нових надшвидких електронних систем модуляції, комутації та прийому лазерного випромінювання. При цьому потрібна заміна кінцевого обладнання. Крім цього потрібна реконструкція або установка нових регенераційних пунктів, що не потребують обслуговування, врізка нових компенсаторів тощо. Як результат, великі матеріальні витрати організаціями, що проводять переобладнання та експлуатацію таких систем.

Оцінимо можливість підвищення пропускної здатності ВОСП іншими методами.

1.3 Часове мультиплексування цифрових потоків

Проаналізуємо часове ущільнення каналів (TDM). Цей метод базується на тому, що процес передачі ділиться на низку часових циклів, які у свою чергу розділяються на субцикли (N). Число N визначає у цій системі кількість часових каналів ущільнення. Кожен субцикл повинен бути розділений на тайм-слоти – часові позиції, протягом яких передаються біти одного з компонентних

цифрових потоків. Інша частина позицій відводиться для імпульсів синхронізації, службового зв'язку, вставок. Часове мультиплексування передбачає, що кожному інформаційному каналу системи, прив'язаному до певної оптичної несущої, відводиться для передачі інформації певний часовий інтервал. Таким чином, оптична несуща піддається модуляції сигналом першого інформаційного каналу протягом першого часового інтервалу, потім ця ж несуща – сигналом другого інформаційного каналу протягом другого часового інтервалу і т.д. Важливим з точки зору досяжної швидкості передачі інформації є значення тривалості зазначених вище часових інтервалів. Фактори, що впливають на їх тривалість – швидкість передачі інформації в лінії зв'язку, швидкість перетворення електричних сигналів в оптичні.

Схема передачі оптичних сигналів лінією зв'язку з часовим ущільненням (мультиплексуванням) TDM наведена на рисунку 1.9 [5-6].

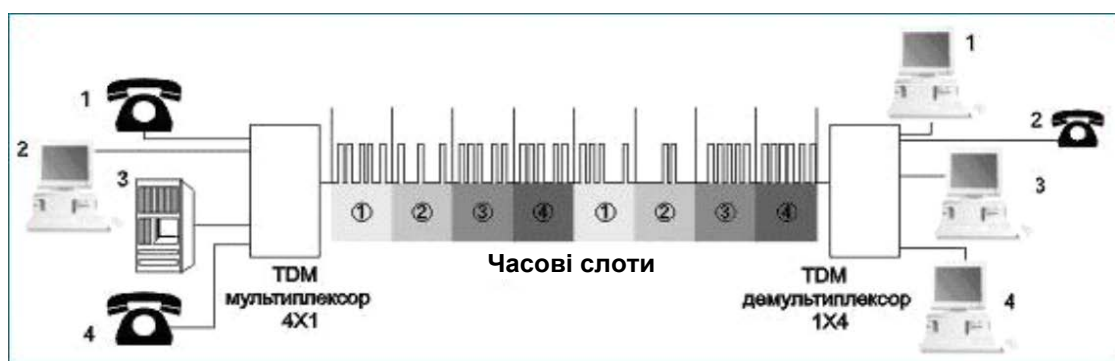


Рисунок 1.9 – Схема передачі оптичних сигналів лінією зв'язку з часовим мультиплексуванням TDM

На вході і виході лінії встановлені відповідно мультиплексор та демультіплексор. Вони спільно забезпечують черговість передачі сигналів різних каналів, часові інтервали та в кінцевому виді ідентифікують номер каналу. Мультиплексор на одній стороні каналу зв'язку збирає дані з усіх джерел та передає їх волокном протягом відповідних тайм-слотів. Демультіплексор на з іншого боку лінії зв'язку виділяє тайм-слоти, зчитує дані та передає їх відповідним користувачам вже як єдиних вихідних потоків.

Принцип часового ущільнення каналів підтримується структурою первинної мережі таким чином, що на кожному вищому рівні ієрархії кількість компонентних каналів в інтегральному потоці у ціле число разів більша.

Використання технології TDM дозволило збільшити пропускну здатність волоконно-оптичних ліній зв'язку до 10 Гбіт/с. Лінії зі швидкістю 10 Гбіт/с будуть поступово замінювати системи TDM на 2,5 Гбіт/с, які зараз використовуються. Швидкість передачі 10 Гбіт/с певною мірою розмежовує два типи систем TDM. Вище цієї швидкості деякі основні характеристики оптичного волокна – поляризаційна модова дисперсія, хроматична дисперсія – починають значно впливати на якість передачі і повинні братися до уваги при розробленні систем зв'язку. Це є серйозною перешкодою для нових розробок, націлених на швидкість 40 Гбіт/с і вище. Крім того, для подальшого збільшення швидкості потрібні нові методи модуляції лазерного випромінювання, що веде до зростання складності та вартості приймально-передавального обладнання. У таблиці 1.1 наведено стандартні інтерфейси та відповідні їм швидкості передачі ієрархій SDH/SONET [6].

Таблиця 1.1 – Стандартні інтерфейси та відповідні швидкості передачі

Оптичний модуль SONET	Синхронний транспортний модуль SDH	Швидкість передачі
OC-3	STM-1	155 Мбіт/с
OC-12	STM-4	622 Мбіт/с
OC-48	STM-16	2,5 Гбіт/с
OC-192	STM-64	10 Гбіт/с
OC-768	STM-256	40 Гбіт/с

Одним із суттєвих факторів, що обмежують при застосуванні технології TDM швидкість передачі сигналу, є хроматична дисперсія. Цим явищем називають залежність ефективного показника заломлення від довжини хвилі, і наслідок цієї залежності - розширенні оптичних імпульсів при їх поширенні по волокну. Розширення зростає зі збільшенням довжини лінії. Так, для вузькосмугового лазера (з шириною спектра не більше 0,1 нм) зі збільшенням швидкості передачі з 2,5 Гбіт/с (STM-16) до 10 Гбіт/с (STM-64) через вплив

хроматичної дисперсії максимально можлива довжина лінії зв'язку зменшується у 16 разів. Застосування методів, що зменшують вплив хроматичної дисперсії, веде до збільшення втрат, вартості та складності системи. Для стандартного ступінчастого одномодового волокна (G.652 за класифікацією ITU) максимальна дальність передачі зі швидкістю 10 Гбіт/с без компенсації та корекції дисперсії складає 50-75 км.

Для зменшення впливу хроматичної дисперсії у якості джерела випромінювання застосовують вузькосмугові лазери з довжиною хвилі випромінювання, близькою до довжини хвилі нульової дисперсії волокна. Працювати безпосередньо на довжині хвилі нульової дисперсії волокна не доцільно через зростаючий вплив чотирехвильового ефекту змішування FWM (Four-Wave Mixing). На жаль, частота випромінювання лазерів з внутрішньою модуляцією може певним чином змінюватись у часі. Це негативне явище називається чирпуванням (Chirp), а модульований сигнал, несуща якого змінюється таким чином - чірпованим сигналом. Чирпування призводить до значного розширення спектра імпульсів, що генеруються. Його можна значно зменшити, використовуючи в якості передавачів лазери з зовнішньою модуляцією. Такий підхід знайшов практичне застосування у сучасних високошвидкісних системах передачі.

Подальше збільшення швидкості передачі за допомогою технології TDM вимагає розробки та впровадження виключно складних та дорогих електронних компонентів. Вся вартість їхньої розробки лягає на плечі оптичної промисловості, тому що в інших областях (наприклад, комп'ютерні технології) ці швидкості ще не досягнуто. Точність синхронізації сигналів систем передачі, що пред'являються при модуляції струму лазерів, мультиплексуванні та демультиплексуванні електричних сигналів на надвисоких частотах, дуже високі.

Технологія завадостійкого кодування FEC (Forward Error Correction) може збільшити енергетичний потенціал системи на кілька дБ. FEC давно використовується в бездротовому та супутниковому зв'язку. У цій технології

дані перед передачею кодуються з додаванням надлишкових бітів. Надмірність дозволяє виправляти випадкові помилки у цифровому сигналі без повторної передачі. У технології FEC виявлення та виправлення помилок передачі бітів виконується апаратурою, як правило, фізично. Однак завадостійке кодування не в змозі виправити всі помилки передачі, які виникають через різні причини (хроматична дисперсія, поляризаційна модова дисперсія, перехресні завади тощо).

Незалежно від того, чи стане технологія TDM універсальним протоколом, таким як IP, або буде адаптована відповідно до стандартів SONET/SDH, найближчі роки її будуть використовувати багато операторів. Нові можливості технології TDM забезпечили успіхи у вивченні солітонів. Якби проблеми не виникли в технології TDM і якби шляхи їх вирішення не використовувалися, ні одна існуюча технологія не може її замінити в даний час. Однак технологія WDM може використовуватися паралельно з технологією TDM для підвищення її ефективності.

1.4 Хвильове мультиплексування WDM

1.4.1 Основні компоненти системи WDM

WDM - мультиплексування з розділенням по довжині хвилі – досить прогресивна технологія оптоволоконного зв'язку. Це технологія передачі даних шляхом об'єднання кількох оптичних сигналів з різними довжинами хвилі та швидкостями у різних оптичних каналах для проходження в одному й тому самому оптичному волокні. Цифрові сигнали, що передаються на різних довжинах хвилі, можуть мати однакову швидкість, один і той же формат або різну швидкість і різні формати даних.

Базовий склад системи WDM має дві конфігурації: двоволоконна однонаправлена передача і одноволоконна двонаправлена передача [6, 8].

Однонаправлений WDM означає, що всі оптичні шляхи мають один напрямок в одному волокні. На стороні передавача формуються оптичні

сигнали з різними довжинами хвилі, що містять різну інформацію, об'єднуються через оптичний подовжувач і передаються по одному волокну в одному напрямку. Оскільки кожен сигнал переноситься світловими хвилями різної довжини, вони не перетинаються між собою у частотному вимірі. На приймальному кінці оптичні сигнали різної довжини розділяються оптичними мультиплексорами для завершення передачі декількох оптичних сигналів. Протилежний напрямок створюється в іншому оптичному волокні.

Двонаправлений WDM означає, що оптичні сигнали передаються в двох різних напрямках по одному волокну одночасно, а різні довжини хвиль забезпечують повнодуплексний (незалежний) зв'язок між двома сторонами.

Система WDM зазвичай складається з чотирьох частин: оптичного передавача, оптичного релейного підсилювача, оптичного приймача та оптичного контрольного каналу.

Ключовими компонентами технології WDM у системі є оптичний мультиплексор і демультимплексор з розподілом по довжині хвилі. Їх продуктивність має вирішальне значення для якості передачі системи. Мультиплексор об'єднує сигнали різної довжини хвилі джерела світла на вході передавального волокна.

Пристрій, який розділяє багатохвильовий сигнал від одного і того ж волокна на окремі довжини хвилі, називається демультимплексором. Він є оборотним – тобто, якщо вхід і вихід демультимплексора поміняти місцями, він стає мультиплексором. Якісні показники оптичного мультиплексора з розподілом по довжині хвилі залежать від перехресних завад, зміщення частоти. Якщо врахувати, що довжина хвилі помножена на частоту дає швидкість світла (константа), то технологія WDM – це мультиплексування з частотним розділом. Схематично принцип роботи WDM показано на рис. 1.10.



Рисунок 1.10 – Принцип роботи WDM

Роль мультиплексування з розділенням за довжиною хвилі полягає у покращенні пропускної спроможності оптичного волокна та ефективності використання ресурсів оптичного волокна. Вочевидь, що для нормальної роботи системи WDM необхідно контролювати довжину хвилі (частоту) кожного оптичного сигналу. Якщо інтервал довжин хвиль занадто короткий, його легко розділити на окремі канали. Якщо інтервал довжин хвиль занадто великий, коефіцієнт використання оптичного волокна буде низьким, оскільки канали у цьому випадку широкосмугові і їх може бути створено менше.

Рисунок 1.11 демонструє трансформацію єдиного каналу у WDM [5-7].

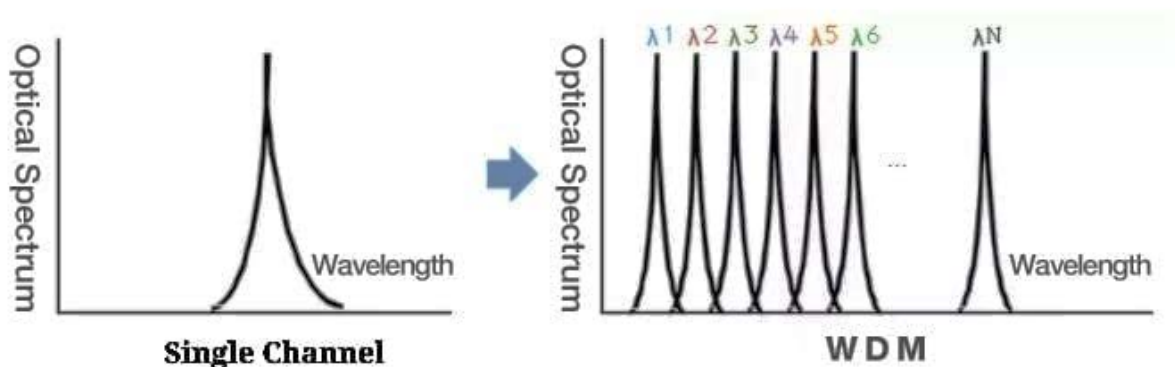


Рисунок 1.11 – Трансформація єдиного каналу у WDM

Технологія WDM дуже важлива для розширення мережі, надання широкосмугових послуг, збільшення пропускної спроможності оптоволокна.

1.4.2 Переваги і проблеми технології WDM

Система WDM представлена на рис. 1.12.

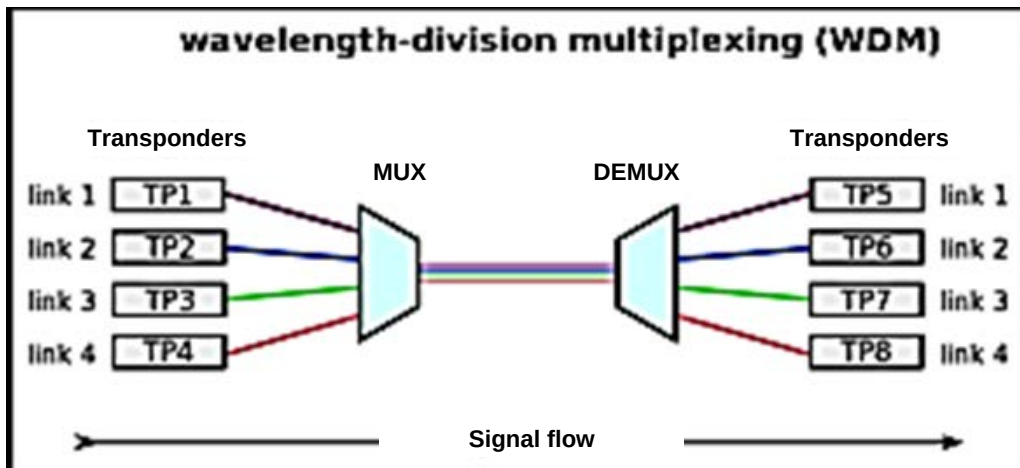


Рисунок 1.12 – Система WDM

Технологія WDM швидко розвивається останніми роками через такі переваги [6-8].

1. Велика пропускна здатність, яка може заощадити цінні ресурси волокна. Для однохвильової оптоволоконної системи передачі і прийому сигналу потрібна пара волокон. Така ж пара волокон, незалежно від кількості сигналів потрібна для всієї системи мультиплексування WDM. Наприклад, для шістнадцяти систем зі швидкістю 2.5 Гбіт/с для однохвильової оптоволоконної системи потрібно 32 волокна, а для системи WDM — лише два волокна.

2. Система WDM прозора для всіх видів службових сигналів. Вона може передавати різні типи сигналів, такі як цифрові та аналогові сигнали, а також може їх синтезувати та розкласти.

3. Немає необхідності прокладати більше оптичних волокон або використовувати високошвидкісні мережні компоненти під час розширення мережі. Впровадження будь-яких нових послуг або розширення пропускної спроможності можливе лише за рахунок зміни терміналу та додавання додаткової оптичної довжини хвилі. Таким чином, технологія WDM є ідеальним засобом розширення.

4. Побудувати оптичну мережу, що динамічно реконфігурується, і використовувати оптичні мультиплексори введення-виведення (OADM) або оптичне кросове обладнання (OXC) в мережевих вузлах для формування гнучкої, надійної та відмовостійкої повністю оптичної мережі.

Тепер проаналізуємо проблеми, які існують в технології WDM [8, 9].

Оптична мережа передачі, заснована на технології WDM, з функцією мультиплексування введення-виведення та функцією перехресного з'єднання, має великі переваги, такі як простота реконфігурації та хороша масштабованість. Це стало тенденцією розвитку мережі високошвидкісної передачі у майбутньому. Але перш ніж це може бути реалізовано, необхідно вирішити такі проблеми.

Управління мережею.

В даний час мережеве керування системою WDM, особливо зі складними вимогами до шляхів вгору/вниз, все ще недосконале. Якщо система WDM не може забезпечити ефективне керування мережею, її буде важко впровадити у мережу у великих масштабах. Оскільки система WDM може підтримувати різні типи службових сигналів по оптичному каналу, то у разі відмови операційна система повинна вчасно виявити несправність та з'ясувати її причину.

Але програмне забезпечення для експлуатації та обслуговування поки що недосконале. Для управління продуктивністю необхідно знайти новий параметр для точного вимірювання якості обслуговування, що надається мережею користувачам. Причина у тому, що системи WDM використовують аналогові методи для мультиплексування та підсилення оптичних сигналів, тому частота помилок по бітах, що зазвичай використовується, не підходить для вимірювання якості послуг WDM. Ці проблеми потрібно вирішити вчасно, щоб не гальмувати розвиток системи WDM.

Взаємозв'язок.

Оскільки WDM є новою технологією, її галузевий стандарт відносно недосконалий, тому функціональна сумісність продуктів WDM у різних сферах діяльності бажає кращого, особливо в аспекті мережевого управління верхнього

рівня. Щоб забезпечити великомасштабне впровадження систем WDM у мережі, необхідно забезпечити функціональну сумісність між системами WDM, а також взаємозв'язок між системами WDM та традиційними системами. Тому дослідження в галузі оптичного інтерфейсного обладнання мають бути посилені.

Оптичний пристрій

Незрілість деяких важливих оптичних пристроїв, таких як лазери, що перебудовуються, безпосередньо обмежує розвиток мереж оптичної передачі. Деяким великим операційним компаніям вже дуже складно поводитися з декількома різними лазерами в мережі, не кажучи вже про десятки оптичних сигналів. У більшості випадків для використання в оптичній мережі потрібно від 4 до 6 лазерів, які можна налаштувати у всій мережі, але такі лазери, що перебудовуються, ще не доступні у продажу. Функціональна схема лазера, що перебудовується, наведена на рис. 1.13.

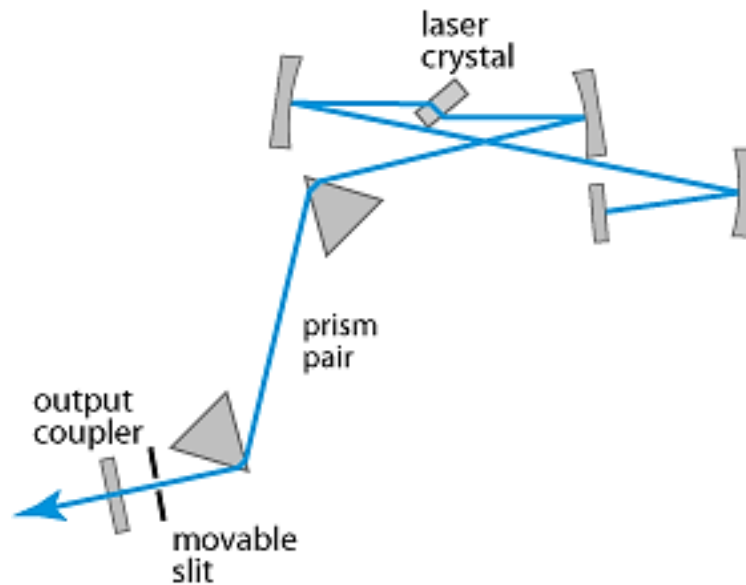


Рисунок 1.13 – Функціональна схема лазера, що перебудовується

1.4.3 Порівняння технологій CWDM та DWDM

WDM, у якому відстань між довжинами хвиль становить десятки нанометрів, називається грубим мультиплексуванням з розділенням по довжині хвилі (CWDM). Це особлива технологія WDM, яка визначена Міжнародною спілкою електрозв'язку в Рекомендації ITU-T G.694.2.

Технологія розвивалась і інтервал між довжинами хвиль ставав дедалі коротшим. При інтервалі в межах кількох нанометрів технологію було названо щільним мультиплексуванням з розділенням по довжині хвилі (DWDM) [5-7].

CWDM-модуляція використовує лазери, що не охолоджуються, а в DWDM - охолоджувані лазери. Охолоджувані лазери для DWDM налаштовуються за температурою, а лазери, що не охолоджуються, налаштовуються електронним способом. Реалізувати налаштування температури складно і дорого, оскільки розподіл температури дуже нерівномірний у широкому діапазоні довжин хвиль. CWDM дозволяє уникнути цієї проблеми і, таким чином, значно знижує вартість. Вартість всієї системи CWDM становить лише 30% вартості DWDM. CWDM досягається шляхом об'єднання довжин хвиль, що передаються з різних волокон, в одне волокно для передачі з використанням оптичного мультиплексора. На приймальному кінці каналу демультимплексор використовується для відправки виділених довжин хвиль по різних волокнах, а потім до різних приймачів.

Таблиця 1.2 – Розподіл довжин хвиль для технології CWDM

Номер довжини хвилі	Центральна довжина хвилі, нм	Номер довжини хвилі	Центральна довжина хвилі, нм
1	1471	10	1291
2	1491	11	1311
3	1511	12	1331
4	1531	13	1351
5	1551	14	1371
6	1571	15	1391
7	1591	16	1411
8	1611	17	1431
9	1271	18	1451

CWDM має інтервал довжин хвиль 20 нм та 18 діапазонів хвиль від 1270 нм до 1610 нм. Розподіл довжин хвиль для технології CWDM показано в таблиці 1.2. Це особлива технологія WDM, яка визначена Міжнародною спілкою електрозв'язку в Рекомендації ITU-T G.694.1.

У діапазоні хвиль від 1270 до 1470 нм має місце очевидне згасання сигналу, тому технологія CWDM віддає перевагу використанню 8 діапазонів хвиль від 1470 до 1610 нм, рисунок 1.14 [8-10].

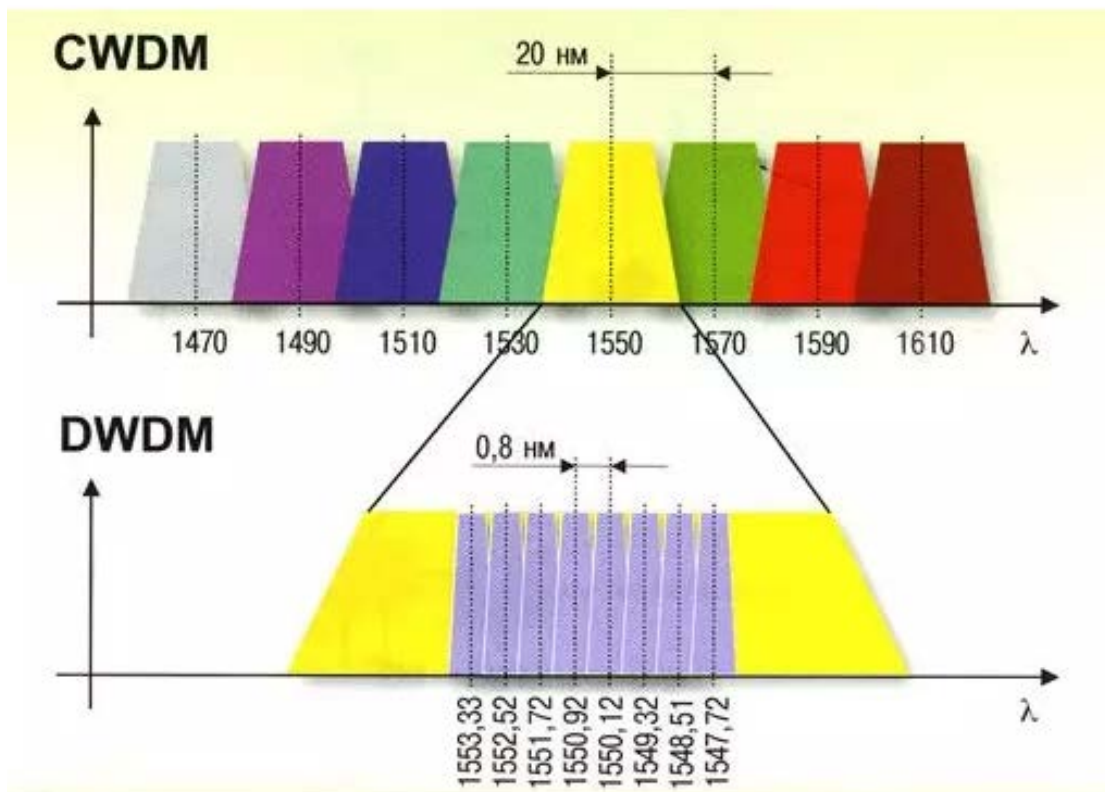


Рисунок 1.14 – Робочі діапазони технологій CWDM та DWDM

Відстань між довжинами хвиль DWDM може становити 1.6 нм, 0.8 нм, 0.4 нм та 0.2 нм, що дозволяє розмістити 40/80/160 хвиль (до 192 хвиль). Діапазон хвиль DWDM, рисунок 1.14, становить від 1525 до 1565 нм (діапазон C) та від 1570 до 1610 нм (діапазон L).

Зазвичай технологія DWDM використовує діапазон хвиль C (від 1525 до 1565 нм) з інтервалом довжин хвиль 0,4 нм (частотний інтервал між каналами – 50 ГГц).

Зазначимо ще деякі відмінності між CWDM та DWDM.

CWDM має більш просту структуру.

Ця система не використовує оптичні підсилювачі та не використовує технологію балансування потужністю, оскільки рознесення каналів відносно велике.

CWDM споживає менше енергії.

Експлуатаційні витрати системи оптичної передачі залежать від її обслуговування та потужності, що споживається системою. Навіть якщо витрати на обслуговування систем DWDM і CWDM є близькими і незначними, то енергоспоживання системи DWDM набагато вище, ніж у системи CWDM. У системах DWDM із збільшенням загальної кількості мультиплексованих довжин хвиль та швидкостей одноканальної передачі втрати потужності та управління температурою стали ключовими проблемами при проектуванні друкованих плат. В CWDM використовуються лазери без охолоджувачів, що призводить до низького енергоспоживання системи.

CWDM-пристрої мають менші габарити.

Лазери CWDM набагато менші у порівнянні з лазерами DWDM. Неохолоджувані лазери (для CWDM) зазвичай складаються з лазерного листа і контрольного фотодіода, закритих у металевому контейнері зі скляним вікном. Розмір лазерного передавача DWDM приблизно вп'ятеро перевищує обсяг лазерного передавача CWDM. Тобто, якщо об'єм лазерного передавача DWDM 100см³, об'єм лазера CWDM без кулера всього 20см³.

CWDM висуває нижчі вимоги до середовища передачі.

Для реалізації послуги вище 10G технологія DWDM потребує оптичні волокна G.655. Що стосується CWDM, то оптичні волокна G.652, G.653 та G.655 можуть бути задіяні. Це означає, що CWDM може використовувати старий оптоволоконний кабель, раніше прокладений.

Порівняльні характеристики технологій грубого та щільного принципів мультиплексування CWDM та DWDM зведені в таблицю 1.3.

Таблиця 1.3 – Порівняльні характеристики технологій CWDM та DWDM

Характеристика	CWDM Грубе мультиплексування з розділенням за довжиною хвилі	DWDM Щільне мультиплексування з розділенням за довжиною хвилі
Хвильовий інтервал	20 нм у цілому	0,8нм/0,4нм/0,2нм/1,6нм
Діапазон хвиль	від 1270 до 1610 нм	від 1525 до 1565 нм (C) від 1570 до 1610 нм (L)
Кількість діапазонів хвиль	18	40/80/160/(до 192)
Форма оптичної модуляції	Лазер без охолодження з електронним налаштуванням	Лазер з охолодженням з налаштуванням за температурою
Ціна	низька	висока
Дальність зв'язку	Коротка (оптичні підсилювачі не підтримуються)	Велика
Структура	проста	Складна (комплекс)
Потужність споживання	низька	висока
Габарити	Малі	Великі
Вимоги до середовища передачі	Низькі	Високі

1.5 Порівняльні характеристики TDM та WDM

Технології WDM (Wavelength Division Multiplexing) та TDM (Time Division Multiplexing) – це два основні методи мультиплексування, які використовуються в мережах передачі даних на основі оптичного волокна. Ось порівняльні характеристики між ними [7]:

1. Принцип роботи.

Технологія WDM використовує різні довжини хвиль світла для передачі кількох незалежних потоків даних через оптичне волокно одночасно.

Технологія TDM працює за принципом доступ до спільного каналу передачі даних за часом, поділяючи його на невеликі часові інтервали,

протягом яких кожному пристрою або каналу виділяється свій часовий слот для передачі даних.

2. Пропускна спроможність.

Технологія WDM дозволяє значно збільшити пропускну здатність оптичного волокна за рахунок одночасної передачі кількох каналів даних на різних довжинах хвиль.

Пропускна здатність технології TDM обмежена часовими слотами. Максимальна пропускна здатність залежить від частоти кадрів, кількості пристроїв, що беруть участь у мультиплексуванні, суттєво обмежується дисперсією світла та залежить від дальності зв'язку.

3. Гнучкість.

WDM дозволяє додавати та видаляти канали з різними довжинами хвиль без істотного впливу на інші канали мережі.

У TDM гнучкість обмежена кількістю доступних часових слотів і зміна структури часового мультиплексування може потребувати значної переконфігурації мережі.

4. Використання ресурсів.

WDM використовує ресурси оптичного волокна ефективніше, оскільки для здійснення передачі інформації може використовувати весь спектр довжин хвиль.

TDM може бути менш ефективним у використанні ресурсів, оскільки деякі часові слоти можуть залишатися невикористаними, якщо відповідні пристрої не надсилають дані. Фактично має місце неповноцінне використання можливостей оптичного волокна.

5. Застосування.

Технологія WDM широко використовується в оптичних мережах передачі даних на значні відстані та з високою пропускнуою здатністю.

Технологія TDM застосовується переважно у локальних та телефонних мережах для передачі даних та голосового зв'язку, де не передбачаються надвисокі швидкості передачі інформації.

Загалом вибір між WDM і TDM залежить від вимог конкретного застосування, включаючи пропускну здатність, гнучкість, вартість та інші фактори.

1.6 Висновки до розділу

Проаналізовано роботу структурних схем, побудованих за принципом однохвильового та багатохвильового лінійного оптичного тракту. Розглянута проблематика підвищення пропускнуєї спроможності ВОСП. Показано, що швидкодія електронних компонентів волоконно-оптичної системи передачі є обмежуючим фактором збільшення швидкості передачі даних для технології TDM. Ефективною альтернативою цій технології є WDM.

Технологія WDM (Wavelength Division Multiplexing) є методом мультиплексування, який використовується в оптичних мережах передачі даних для збільшення пропускнуєї спроможності та ефективності передачі. Основні характеристики технології WDM.

1. Мультиплексування за довжиною хвилі - WDM дозволяє одночасну передачу кількох потоків даних по одному оптичному волокну шляхом використання різних довжин хвиль світла. Кожен потік даних (або канал) зв'язується з унікальною довжиною хвилі, що дозволяє існувати незалежно один від одного всередині одного оптичного волокна.

2. Збільшення пропускнуєї спроможності. Шляхом використання різних довжин хвиль для різних каналів, WDM дозволяє значно збільшити пропускну спроможність оптичного волокна. Це дозволяє передавати більший обсяг даних через мережу без збільшення кількості фізичних кабелів або волокон.

3. DWDM та CWDM. Існує два основних варіанти WDM - це Dense WDM (DWDM) та Coarse WDM (CWDM). DWDM забезпечує більш високу густину каналів і зазвичай використовується для передачі даних на довгі відстані з високою пропускнуєю здатністю. У той час як CWDM має більш широкі

проміжки між довжинами хвиль і зазвичай використовується для більш коротких відстаней та менш інтенсивних вимог до пропускної спроможності.

4. Гнучкість та масштабованість. WDM забезпечує гнучкість та масштабованість мереж, оскільки нові канали можуть бути легко додані або видалені без необхідності зміни інфраструктури волоконно-оптичної мережі.

5. Висока швидкість передачі даних. Оскільки кожен канал WDM може передавати дані незалежно один від одного, технологія забезпечує високу швидкість передачі через оптичне волокно.

Технологія WDM є основою для побудови сучасних оптичних мереж зв'язку та відіграє ключову роль у забезпеченні ефективної передачі даних на тривалі відстані з високою швидкістю та пропускною спроможністю.

2 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ЛІНІЙНОГО ТРАКТУ З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕХНОЛОГІЇ WDM

2.1 Побудова ОЛТ ВОСП з WDM

Структурна схема системи з WDM для одного напрямку передачі представлена на рисунку 2.1 [5].

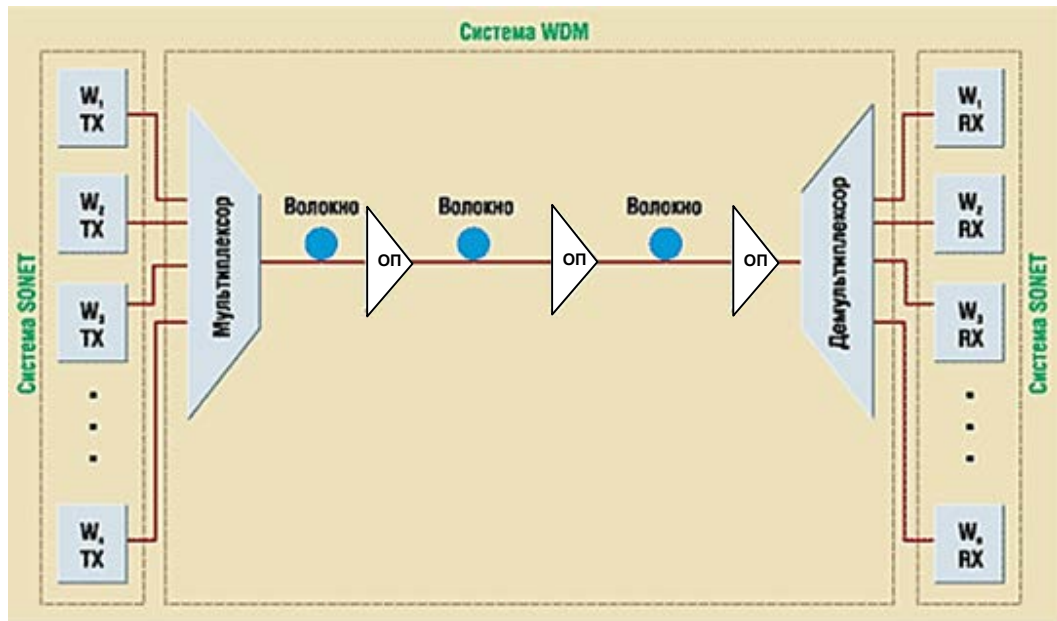


Рисунок 2.1 – Структурна схема ВОСП з WDM

Вхідні потоки даних (кодованих цифрових імпульсних послідовностей) модулюють за допомогою оптичних модуляторів M_i оптичні несучі з довжинами хвиль λ_i . Далі вони мультиплексуються (об'єднуються) за допомогою мультиплексора WDM MUX в агрегатний потік, який після підсилення підсилювачем потужності вводиться в оптичне волокно (ОВ). На приймальному кінці потік із виходу ОВ підсилюється попереднім підсилювачем – ПУ, демultipлексується, (поділяється на складові потоки – модульовані несучі λ_i), які детектуються за допомогою детекторів D_i . Перед детекторами можуть додатково використовуватися смугові фільтри Φ_i для зменшення перехідних завад і збільшення завадостійкості детектування. Демодулятори DM_i формують вихідні кодові цифрові імпульсні послідовності.

Окрім підсилювачів потужності та попередніх підсилювачів в системі можуть бути використані також лінійні підсилювачі – ЛП.

Хвильове мультиплексування спочатку було спрямоване на об'єднання двох основних несущих 1310 нм та 1550 нм (2-го та 3-го вікон прозорості) в одному оптоволокну, що дозволяло подвоїти ємність системи та було виправдано всією історією розвитку ВОЛЗ. Такі системи називають широкосмуговими WDM (рознесення за довжиною хвилі – 240 нм) на противагу вузькосмуговим WDM, у яких рознесення значно менше – 24-12 нм. У вузькосмуговій системі WDM, таким чином, можна розмістити в 3 вікні (1550 нм) 4 канали. Такий поділ систем видається на даний момент не зовсім коректним, тому що у таких "широкосмугових" WDM спектр не перекривався, а складався з двох ізольованих смуг.

Щоб наблизитися до взаємної сумісності обладнання різних виробників систем WDM, а також позиціонувати вже існуючі WDM системи, необхідно стандартизувати номінальний ряд несущих – “канальний або частотний план”. Стандарт ITU-T Rec. G.692 сектору стандартизації МСЕ це питання вирішив.

В основу проекту стандарту покладено канальний (частотний) план з рівномірним розташуванням несущих частот каналів з мінімальним рознесенням (кроком) каналів на 100 ГГц. Для кроку 100 ГГц у цьому діапазоні можна розмістити максимально 51 канал з відповідними значеннями несущих.

Схема розширеного канального плану лягла в основу класифікації WDM: грубі (CWDM), щільні (DWDM) та надщільні (HDWDM), про які вже мова йшла вище. Поки-що не існує чітких границь між цими типами WDM, хоча дотримуються такого критерію: системи CWDM – це системи з частотним рознесенням 200 ГГц, які дозволяють мультиплексувати до 16 каналів; системи DWDM – це системи з рознесенням каналів не менше 100 ГГц, які дозволяють мультиплексувати не більше 64 каналів.

2.2 Вибір джерела випромінювання та фотоприймача

Wavelength Division Multiplexing (WDM) використовується для комбінування кількох потоків даних на різних довжинах хвиль в єдиний оптичний сигнал. У системах оптичного зв'язку зазвичай використовують лазерні діоди як джерела випромінювання та фотодіоди як приймачі.

Для системи WDM важливо вибрати джерела випромінювання та приймачі, які працюють на різних довжинах хвиль. Наприклад, для двоканальної WDM-системи можна вибрати два різних типи лазерних діодів, кожен з яких випромінює на різних довжинах хвиль, і два відповідні фотодіоди для прийому сигналів на цих довжинах хвиль.

Як правило, джерела випромінювання та приймачі вибираються таким чином, щоб мінімізувати перекриття спектрів сигналів та максимізувати пропускну здатність системи. Це також забезпечує мінімальний вплив крос-модуляції та міжмодових завад.

У системах оптичного зв'язку з використанням WDM існує кілька типів джерел випромінювання, які підходять для цієї технології [10].

1. Лазерні діоди (LD). Лазерні діоди – одне з найпоширеніших джерел випромінювання в оптичному зв'язку. Вони характеризуються високою потужністю та вузькою шириною спектральної лінії, що робить їх ідеальним вибором для систем WDM.

2. Fabry-Perot лазери. Це тип напівпровідникових лазерів, який також використовується в оптичному зв'язку. Вони забезпечують вузьку спектральну ширину та високу потужність випромінювання.

3. DFB (Distributed Feedback) лазери. Ці лазери забезпечують стабільне випромінювання на певній довжині хвилі завдяки ґратчастим ґратам, розподіленим уздовж активного об'єму. DFB-лазери також широко використовують у системах WDM.

4. VCSEL (Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser). Це тип лазерів, який випромінює світло вертикально із поверхні напівпровідникового чіпа. Вони

забезпечують високу продуктивність за низької вартості та можуть бути ефективно використані у WDM системах.

5. Надлюмінесцентні діоди (SLD). Ці джерела мають ширший спектр випромінювання у порівнянні з лазерними діодами, що може бути корисним у деяких додатках WDM.

Вибір конкретного типу джерела залежить від вимог продуктивності, бюджету та інших чинників конкретної системи оптичного зв'язку.

Для оптичних систем зв'язку із застосуванням WDM також використовують різні типи приймачів оптичного сигналу, які будуються за принципом використання різних оптико-електричних перетворювачів [11].

1. Фотодіоди (PD). Це найпоширеніший тип приймача оптичних систем зв'язку. Фотодіоди перетворюють оптичний сигнал на електричний сигнал. Вони зазвичай використовуються у парі з лазерними діодами.

2. Фотоприймачі з підсиленням (APD). Фотоприймачі з підсиленням забезпечують підсилення електричного сигналу, що дозволяє покращити чутливість системи зв'язку. Вони особливо корисні в системах з великою дальністю передачі або системах з низьким рівнем сигналу.

3. Фотодетектори з інтегрованим підсиленням (IDP). Ці приймачі поєднують функції фотодіода і підсилення в одному пристрої. Вони характеризуються високою чутливістю та широким динамічним діапазоном.

4. Приймачі з інтегрованим підсиленням та конверсією (ICR). Ці приймачі перетворюють оптичний сигнал безпосередньо на цифровий формат, що зменшує потребу у зовнішніх пристроях обробки сигналу.

5. Оптичні ресивери з обмеженим полем зору (FOV). Ці приймачі мають здатність реєструвати оптичні сигнали з обмеженої області простору, що може бути корисно в певних додатках, наприклад, в мережах з безліччю розподілених джерел.

Вибір конкретного типу приймача залежить від вимог до продуктивності, бюджету та інших чинників системи зв'язку.

При аналізі джерел випромінювання та приймачів оптичних сигналів з точки зору максимальної швидкості передачі слід враховувати кілька ключових параметрів, включаючи пропускну здатність, ширину спектральної лінії, швидкість модуляції тощо.

Джерела випромінювання.

1. Лазерні діоди (LD). LD мають високу швидкість модуляції та забезпечують високу пропускну здатність. Вони зазвичай використовуються для передачі даних на високих швидкостях в оптичних системах.

2. DFB (Distributed Feedback) лазери. DFB лазери забезпечують стабільне випромінювання на певній довжині хвилі, що дозволяє їм забезпечувати високу швидкість передачі даних та гарну ширину смуги пропускання.

3. VCSEL (Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser). VCSEL мають нижчу вартість виробництва та менше енергоспоживання порівняно з іншими типами лазерів. Однак їх швидкість передачі даних може бути дещо нижчою в порівнянні з LD або DFB лазерами.

Приймачі оптичних сигналів.

1. Фотодіоди (PD). Фотодіоди здатні обробляти високочастотні оптичні сигнали та забезпечувати високу швидкість передачі даних. Вони є одним із найшвидших типів приймачів.

2. Фотоприймачі з підсиленням (APD). APD забезпечують підсилення сигналу, що дозволяє працювати на більш високих швидкостях передачі даних. Вони часто використовуються в системах з високими вимогами до чутливості та швидкості передачі.

3. Приймачі з інтегрованим підсиленням та конверсією (ICR). ICR забезпечують пряму конверсію оптичного сигналу в цифровий формат, що може бути корисним для швидкої передачі даних без додаткової обробки.

В цілому для досягнення максимальної швидкості передачі даних в оптичній системі потрібно поєднання високошвидкісних джерел випромінювання та приймачів з відповідною електронікою та обробкою сигналів.

На вибір типу джерела випромінювання в оптичній системі впливає очікувана дисперсія в оптичному волокні. Дисперсія волокна може бути викликана різними фізичними явищами, такими як дисперсія модального запізнення, дисперсія хроматичного запізнення та дисперсія поляризації. Зазначимо, які типи джерел випромінювання можуть бути кращими залежно від типу дисперсії.

1. Дисперсія хроматичного запізнення (CD). Цей тип дисперсії виникає через відмінності швидкості поширення світла різних довжин хвиль в оптичному волокні. Лазерні діоди з вузькою лінією спектру або DFB лазери, які забезпечують вузьку спектральну ширину, можуть бути кращими для забезпечення зниження впливу дисперсії хроматичного запізнення.

2. Дисперсія модального запізнення (MD). Цей тип дисперсії виникає через відмінності у часі поширення світла у різних модах волокна. Спектральна ширина джерела випромінювання впливає на дисперсію модального запізнення. Лазерні діоди та VCSEL, які забезпечують вузьку спектральну ширину, можуть допомогти знизити негативний вплив цього типу дисперсії.

3. Дисперсія поляризації. Для цього типу дисперсії необхідно використовувати методи компенсації, такі як використання компенсаційних волокон або спеціальних видів оптичних модулів. Тип джерела випромінювання впливає на поляризацію світла, і важливо вибрати джерело, яке забезпечує стабільність поляризації або може бути легко компенсовано.

Загалом для зниження впливу дисперсії в оптичному волокні важливо вибирати джерело випромінювання з вузькою спектральною шириною і стабільною поляризацією. Лазерні діоди та DFB лазери часто переважають у таких випадках завдяки їх здатності до контрольованої генерації світла.

Окрім джерела випромінювання та приймача оптичного сигналу важливим є вибір матеріалу для оптичного волокна. Світловод складається з концентричних шарів, основним з яких вважаються серцевина і оболонка. Для ефективного проходження оптичного променя по світловоду показники заломлення серцевини і оболонки повинні мати певні значення.

2.3 Розрахунок параметрів багатомодового оптичного волокна зі ступінчастим профілем показника заломлення

Вибираємо для багатомодового оптичного волокна серцевину з кварцу з показником заломлення $n_1 = 1,4469$ на довжині хвилі 1550 нм, а оболонку – з кварцу з домішками барію (86,5 % SiO_2 + 13,5 % B_2O_3). При цьому отримуємо показник заломлення оболонки $n_2 = 1,4454$.

З числовою апертурою зазвичай пов'язують ефективність введення променів у серцевину оптичного волокна. Цей параметр (числова апертура) залежить від значень обох показників заломлення – серцевини і оболонки. Чим більша різниця між показниками заломлення, тим вище ефективність введення і більше променів поширюється у серцевині волокна. Найбільша ефективність була б за відсутності світловідбиваючої оболонки (серцевина в повітрі). У такому разі всі промені, що впали на торець волокна, будуть поширюватися в ньому – ефективність введення становить 100% [10, 11].

Числова апертура.

Як уже зазначалось $n_1 = 1,4469$, $n_2 = 1,4454$.

$$NA = n_0 \cdot \sin \alpha_{\text{кр}} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}. \quad (2.1)$$

$$NA = \sqrt{1,4469^2 - 1,4454^2} = 0,0662.$$

Числова апертура визначає значення критичного кута падіння променю, як це видно з формули (2.1), тобто $\alpha_{\text{кр}} = 3,8^\circ$.

Якщо оболонка відсутня (волокно у повітрі, тобто $n_2 = 1$), то

$$NA = \sqrt{1,4469^2 - 1^2} = 1,046.$$

Усі промені поширюються у волокні.

Багатопроменева міжмодова дисперсія.

Різницю часу поширення осевого та граничного променя в серцевині волокна (найшвидшого і найповільнішого) називають багатопроменевою

часовою дисперсією. На виході волокна ці промені розходяться у часі, що є наслідком різної довжини пройденого шляху. Це збільшує тривалість оптичного сигналу, причому зі збільшенням довжини волокна ця тривалість збільшується. Наслідком цього є обмеження швидкості передачі інформації.

На значення дисперсії впливають оптичні властивості серцевини та світловідбиваючої оболонки. Дисперсія тим більша, чим помітніша різниця в показниках заломлення. Найбільше значення дисперсії, якщо світловідвід не має світловідбивної оболонки. Найменша різниця показників заломлення обмежується чутливістю волокна до макро і мікро вигинів. Тоді змінюється кут повного внутрішнього відбиття на границі «серцевина – оболонка» і промені світла покидають серцевину. Тому, якщо різниця показників заломлення найменша, прокладка кабелю повинна виключати макровигини.

Визначимо багатопроменеву часова дисперсія для волокна без оболонки. Вона нормується на довжину лінії 1 км і визначається тривалість/км [11].

$$\frac{\Delta t}{L} = \frac{n_1}{c} \cdot \frac{n_1 - n_2}{n_2}. \quad (2.2)$$

$$\text{Для } c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с } \frac{\Delta t}{L} = \frac{1,4469}{3 \cdot 10^8} \cdot \frac{1,4469 - 1}{1} = 2,148 \cdot 10^{-9} = 2148 \text{ нс/км.}$$

Для оптичного волокна з наявною світловідбивною оболонкою ($n_2 = 1,4454$) багатопроменева часова дисперсія становитиме (2.2):

$$\frac{\Delta t}{L} = \frac{1,4469}{3 \cdot 10^8} \cdot \frac{1,4469 - 1,4454}{1,4454} = 5 \cdot 10^{-12} = 5 \text{ нс/км.}$$

Пропускна здатність волокна при відсутності світловідбивної оболонки:

$$B \cdot L = \Delta f \cdot L = \frac{L}{\Delta t}. \quad (2.3)$$

$$B \cdot L = \frac{1}{2,148 \cdot 10^{-9}} = 0,466 \cdot 10^9 = 0,466 \text{ МГц} \cdot \text{км.}$$

$$L = \frac{0,466}{155} = 0,003 \text{ км.}$$

Пропускна здатність волокна при наявності оболонки ($n_2 = 1,4454$):

$$B \cdot L = \frac{1}{5 \cdot 10^{-12}} = 0,2 \cdot 10^{12} = 200 \text{ МГц} \cdot \text{км.}$$

$$L = \frac{200}{155} = 1,29 \text{ км.}$$

Розрахунок показав, що за умови використання волокна зі ступінчатим профілем заломлення оптичні підсилювачі повинні розташовуватися через кожні 1,29 км.

Номінальна частота.

Формула для визначення номінальної частоти:

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}. \quad (2.4)$$

$$V = \frac{50\pi}{1,55} \cdot 0,0662 = 6,705.$$

Кількість мод визначається за формулою:

$$M = \frac{V^2}{4}. \quad (2.5)$$

$$M = \frac{6,705^2}{4} = 11.$$

2.4 Розрахунок параметрів багатомодового градієнтного волокна

У градієнтному волокні показник заломлення серцевини змінюється по радіусу від осі за певним законом. Траєкторія променів у такому світловоді не ломана лінія, як у ступінчатого волокна, а має форму, наближену до синусоїди. Закон зміни показників заломлення в серцевині можна підбирати, отже траєкторіями руху променів можна керувати. За таких умов для меридіональних променів можна досягти просторового фокусування.

На довжині хвилі 1550 нм вибираємо серцевину з показником заломлення $n_1 = 1,4619$, а світловідбивну оболонку – з показником заломлення $n_2 = 1,4469$.

Розрахунок числової апертури.

Визначимо так зване максимальне значення числової апертури, яке відповідає осьовому збігу джерела оптичного випромінювання та серцевини волокна [12].

$$NA_{max} = n_{cp} \sin \alpha_{кр} = \sqrt{n_{oc}^2 - n(a)^2}. \quad (2.6)$$

$$NA_{max} = \sqrt{1,4619^2 - 1,4469^2} = 0,21.$$

Значення числової апертури є паспортною величиною. Згідно зі стандартом IEC G.651 лежить у межах 0,2 – 0,23.

Розрахунок багатопроменевої міжмодової дисперсії.

Формула для визначення зазначеного параметра має вигляд:

$$\frac{\Delta t}{L} = \left(\frac{t}{L}\right)_{oc} - \left(\frac{t}{L}\right)_{мер} = \frac{n_{oc}}{c} \cdot \frac{\alpha-2}{\alpha+2} \cdot \Delta. \quad (2.7)$$

де Δ - повна відносна різниця показників заломлення

$$\Delta = \frac{n_{oc}^2 - n(a)^2}{2 \cdot n_{oc}^2}. \quad (2.8)$$

$$\Delta = \frac{1,4619^2 - 1,4469^2}{2 \cdot 1,4619^2} = 0,01 = 1\%.$$

Якщо $\alpha = 2$, то міжмодова дисперсія становитиме:

$$\frac{\Delta t}{L} = \frac{n_{oc}}{c} \cdot \frac{\Delta^2}{2}. \quad (2.9)$$

$$\frac{\Delta t}{L} = \frac{1,4619}{3 \cdot 10^8} \cdot \frac{0,01^2}{2} = 2,43 \cdot 10^{-13} = 0,243 \text{ нс/км.}$$

$$B \cdot L = \frac{1}{2,43 \cdot 10^{-13}} = 0,41 \cdot 10^{13} = 4,1 \text{ ГГц} \cdot \text{км.}$$

$$L = \frac{4,1 \cdot 10^3}{155} = 26,45 \text{ км.}$$

Значення багатомодової дисперсії залежить від показників заломлення (2.7) і є найменшим при оптимальному профілі показника заломлення [10-12]:

$$\alpha_{\text{опт}} = 2(1 - \Delta). \quad (2.10)$$

$$\alpha_{\text{опт}} = 2(1 - 0,01) = 1,98.$$

Якщо $\alpha = \alpha_{\text{опт}}$, то міжмодова дисперсія становитиме:

$$\frac{\Delta t}{L} = \frac{1,4619}{3 \cdot 10^8} \cdot \frac{1,98-2}{1,98+2} \cdot 0,01 = 2,449 \cdot 10^{-13} = 0,2449 \text{ нс/км.}$$

$$B \cdot L = \frac{1}{2,449 \cdot 10^{-13}} = 0,408 \cdot 10^{13} = 4,08 \text{ ГГц} \cdot \text{км.}$$

$$L = \frac{4,08 \cdot 10^3}{155} = 26,32 \text{ км.}$$

Аналіз результатів розрахунку показує, що при відхиленні показника α від значення 2, узгодження між часом проходження меридіальних і косих променів погіршується і часова дисперсія зростає.

Зазначимо, що джерела оптичного випромінювання не вважаються монохроматичними. Потужність випромінювання ними зосереджена в деякому хвильовому діапазоні (має певний спектр). Показник заломлення залежить від довжини хвилі, тому ці складові характеризуються різним часом проходження до виходу волокна. В результаті тривалість оптичного імпульсу збільшується – зростає значення матеріальної дисперсії. У загальному матеріальна дисперсія залежить від властивостей оптичного випромінювання та характеристик матеріалу.

Коефіцієнт матеріальної дисперсії.

Коефіцієнт матеріальної дисперсії є функцією від довжини хвилі і залежить від складу матеріалу серцевини. На розрахунковій довжині хвилі $\lambda = 1310$ нм коефіцієнт матеріальної дисперсії практично дорівнює нулю. Вважаємо, що ця довжина хвилі є найбільш прийнятною для багатомодових оптичних волокон, оскільки матеріальна дисперсія практично не проявляється [9, 11].

Номінальна частота.

Визначається за формулою (2.4).

$$V = \frac{50\pi}{1,55} \cdot 0,1788 = 20,25.$$

Кількість мод.

Визначається за формулою (2.5).

$$M = \frac{20,25^2}{4} = 102,5.$$

2.5 Розрахунок параметрів одномодового оптичного волокна

Вибираємо для одномодового оптичного волокна на довжині хвилі 1550 нм серцевину з показником заломлення $n_1 = 1,4469$, а світловідбивну оболонку – з коефіцієнтом заломлення $n_2 = 1,4396$. Оптичне волокно вважається одномодовим, якщо для нього виконується умова стосовно значення номінальної частоти [13]

$$V \leq V_{\text{кр}} = 2,405. \quad (2.11)$$

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \leq 2,405.$$

$$2a \leq \frac{2,405 \cdot \lambda}{\pi \sqrt{n_1^2 - n_2^2}}$$

$$2a = \frac{2,405 \cdot 1,55}{\pi \sqrt{1,4469^2 - 1,4396^2}} = 8,19 \text{ мкм}$$

Прийmemo $2a = 8 \text{ мкм}$.

Тоді:

$$V = \frac{8\pi}{1,55} \sqrt{1,4469^2 - 1,4396^2} = 2,3$$

Умова (2.11) виконується.

Як уже зазначалось, джерела випромінювання не є монохроматичними. В одномодових оптичних волокнах це є основною складовою дисперсії – вона так і називається – хроматична. Складові хроматичної дисперсії: хвильова та матеріальна - мають різний характер залежно від довжини хвилі: матеріальна дисперсія з ростом довжини хвилі має спадаючий характер зі зміною знаку, а хвильова – зростає з ростом довжини хвилі.

$$\frac{\tau}{L} = \left(\frac{\Delta t}{L}\right)_M + \left(\frac{\Delta t}{L}\right)_W = \frac{1}{c\lambda} (Y_M + Y_W) \cdot \Delta\lambda, \quad (2.12)$$

де Y_W, Y_M – коефіцієнти хвильової та матеріальної дисперсії.

$$Y_M = -0,0026.$$

$$Y_W = 0,0028.$$

Визначимо значення хроматичної дисперсії, якщо використовується напівпровідниковий лазер з хвильовим спектром $\Delta\lambda = 1 \text{ нм}$:

$$\frac{\tau}{L} = \frac{1}{3 \cdot 10^8 \cdot 1,55} (-0,0026 + 0,0028) \cdot 1 \cdot 10^{-3} = 4,19 \text{ пс/км}.$$

$$B \cdot L = \frac{1}{0,419 \cdot 10^{-15}} = 2,4 \cdot 10^{15} = 240 \text{ ГГц} \cdot \text{км}$$

$$L = \frac{2,4 \cdot 10^6}{155} = 1550 \text{ км}.$$

Розрахунок коефіцієнта згасання.

Втрати у волокні бувають внутрішні та зовнішні. До внутрішніх відносять втрати, зумовлені розсіюванням та поглинанням.

Може бути поглинання через домішки у матеріалі серцевини і власне поглинання, зумовлене іонним та електронним резонансами. Найбільш небезпечними є ОН та іони перехідних металів: Fe^{2+} , Cr^{3+} , V^{2+} , Mo^{3+} . Зменшити вплив домішок можливо шляхом контролю за технологічним процесом виготовлення заготовки волокна. Основною проблемою залишаються іони гідроксиду ОН, які перебувають у матеріалі серцевини волокна. Пік поглинання спостерігається на довжині хвилі 1,55 мкм. Наразі очищення матеріалу дозволяє значно знизити зазначені втрати.

Щодо власного поглинання в оптичних волокнах, то найкращим для оптичного волокна матеріалом є кварц з домішками окису германію. Власна резонансна частота такого матеріалу знаходиться далеко від робочого діапазону хвиль.

Втрати на поглинання визначаються за формулою [13]:

$$\alpha_n = 8,69 \frac{\pi \cdot n_1}{\lambda} \cdot \text{tg} \delta \cdot 10^3, \text{ дБ/км} \quad (2.13)$$

Втрати на розсіювання:

$$\alpha_p = \frac{c}{\lambda^4} \quad (2.14)$$

Сумарні втрати у світловоді (кілометричне згасання):

$$\alpha = \alpha_n + \alpha_p = 0,22 \text{ дБ/км.}$$

Якщо розраховувати на допустиме загальне згасання сигналу в лінії, яке може бути скомпенсоване підсиленням за допомогою лінійного підсилювача з коефіцієнтом підсилення $P_{\text{підс}} = 20$ дБ, то дальність передачі складе:

$$L = \frac{P_{\text{підс}}}{\alpha} = \frac{20}{0,22} = 90 \text{ км.}$$

2.6 Розрахунок довжини регенераційної ділянки з урахуванням згасання

Рівняння енергетичного балансу [6]:

$$E = \alpha_k L_{\text{др}} + \alpha_{\text{рз}} n_{\text{рз}} + \alpha_{\text{нз}} n_{\text{нз}} + \alpha_{\text{мз}} + \alpha_{\text{зз}}, \quad (2.15)$$

де E – енергетичний запас системи; $L_{\text{др}}$ – ділянка регенерації; α_k – згасання оптичного волокна (0,22 дБ/км); $n_{\text{рз}}$ – кількість роз’ємних з’єднань; $\alpha_{\text{рз}}$ – згасання в роз’ємних з’єднаннях (0,5 дБ); $n_{\text{нз}}$ – кількість нероз’ємних з’єднань; $\alpha_{\text{нз}}$ – згасання в нероз’ємних з’єднаннях (в місцях зварювання) (0,4 дБ); $\alpha_{\text{мз}}$ – згасання через макровигини (0,5 дБ); $\alpha_{\text{зз}}$ – енергетичний запас (3...5 дБ).

Формула для визначення кількості нероз’ємних з’єднань:

$$n_{\text{нз}} = \frac{L_{\text{др}}}{L_{\text{буд}}} + 1, \quad (2.16)$$

де $L_{\text{буд}}$ – будівельна довжина кабелю (6,4 км).

Підставимо (2.16) в (2.15) і визначимо довжину ділянки регенерації з урахуванням згасання

$$L_{\text{др}} = \frac{E - \alpha_{\text{рз}} n_{\text{рз}} - \alpha_{\text{нз}} n_{\text{нз}} - \alpha_{\text{мз}} - \alpha_{\text{зз}}}{\alpha_k + \alpha_{\text{нз}} / L_{\text{буд}}} \quad (2.17)$$

Енергетичний баланс становить 21 дБ. Враховуючи розшифровки після формули (2.15), отримаємо довжину ділянки регенерації

$$L_{\text{др}} = \frac{21 - 0,5 \cdot 2 - 0,4 - 0,5 - 4}{0,22 + 0,4 / 6,4} = 53,45 \text{ км.}$$

Отже, довжина регенераційної ділянки з урахуванням згасання сигналу становить 53 км.

2.7 Розрахунок довжини регенераційної ділянки з урахуванням дисперсії

Відповідно до рекомендацій ITU-T можна визначити максимально допустимі для ділянки регенерації значення хроматичної дисперсії $D_{др}$ та поляризаційної модової дисперсії $PMD_{др}$ при погіршенні відношення сигнал/шум до 1 дБ.

$$D_{др} = 1040000/B^2. \quad (2.18)$$

$$PMD_{др} = 140/B, \quad (2.19)$$

де B – швидкість передачі інформації, Гбіт/с.

Хроматична дисперсія, приведена до 1 км довжини лінії [6]:

$$D_{хр} = D_{ов} \cdot \Delta\lambda = 18 \cdot 0,1 = 1,8 \text{ пс}/(\text{нм} \cdot \text{км}), \quad (2.20)$$

де $D_{ов}$ – паспортне значення параметра дисперсії; $\Delta\lambda$ – ширина лінії випромінювання лазера, нм.

З урахуванням вище визначеної довжини ділянки регенерації 53 км визначимо значення хроматичної дисперсії на цій ділянці

$$D_{рд} = D_{хрд} \cdot L_{др} \cdot \Delta\lambda = 0,5 \cdot 53 \cdot 0,1 = 2,65 \text{ пс} \quad (2.21)$$

Аналогічно для поляризаційної модової дисперсії

$$PMD_{рд} = PMD_{хрд} \cdot L_{др} \cdot \Delta\lambda = 0,02 \cdot 53 \cdot 0,1 = 1,069 \text{ пс} \quad (2.22)$$

Середньоквадратичне значення дисперсії на номінальній ділянці

$$\sigma = \sqrt{D_{\text{рд}}^2 + PMD_{\text{рд}}^2} = \sqrt{2,65^2 + 1,069^2} = 2,857 \text{ пс.} \quad (2.23)$$

Для синхронного транспортного модуля STM-64 (9,9 Гбіт/с) при кодуванні 8В/10В (частотна модуляція) і коефіцієнті модуляції $10/8=1,25$ отримаємо

$$F_M = 9,9 \cdot 10^9 \cdot 1,25 = 12,37 \text{ ГГц.}$$

$$\tau = \Delta\lambda \cdot \sigma \quad (2.24)$$

де $\Delta\lambda$ – ширина імпульсу лазера (0,1 нм).

$$\tau = 2,857 \text{ пс/км.}$$

Смуга пропускання

$$W = \frac{0,44}{\tau}. \quad (2.25)$$

$$W = \frac{0,44}{2,857 \cdot 10^{-12}} = 15,398 \cdot 10^9 \text{ Гц} \cdot \text{км}$$

$$L = \frac{15,398 \cdot 53}{12,37} = 65,974 \text{ км.}$$

2.8 Висновки до розділу

Наведені рекомендації щодо вибору джерела випромінювання та оптичного приймача з урахуванням технології WDM. Як правило, джерела випромінювання та приймачі вибираються таким чином, щоб мінімізувати перекриття спектрів сигналів та максимізувати пропускну здатність системи. Це також забезпечує мінімальний вплив крос-модуляції та міжмодових завад.

Виконано розрахунки параметрів багатомодового оптичного волокна зі ступінчастим та градієнтним профілями показника заломлення, а також одномодового оптичного волокна. Розрахована довжина регенераційної ділянки з урахуванням згасання оптичного сигналу та його дисперсії.

Дисперсія оптичного сигналу є одним із ключових параметрів, які можуть впливати на ефективність передачі даних як у системах WDM, так і в системах TDM. Основні висновки щодо систем WDM:

- Дисперсія оптичного сигналу може призвести до спотворення форми сигналу в кожному каналі WDM, особливо на великих відстанях передачі. Це може призвести до спотворення даних та погіршення якості сигналу.
- При використанні багатоканальних систем WDM дисперсія може відрізнятися для різних довжин хвиль, що призводить до різного впливу на різні канали.
- Для компенсації дисперсії у системах WDM можуть застосовуватись різні методи, такі як попередня дисперсійна компенсація, компенсація на приймальній стороні з використанням дисперсійних компенсаторів тощо.

Основні висновки щодо систем TDM:

- Дисперсія може виникати особливо під час передачі даних на довгі відстані. Вона може призвести до розмиття часових слотів та спотворення даних.
- У системах TDM зазвичай використовуються пристрої, такі як ретранслятори та підсилювачі, щоб компенсувати втрати сигналу та знизити вплив дисперсії.

Загальні методи боротьби з дисперсією включають використання дисперсійно-компенсаційних пристроїв, розробку алгоритмів корекції та компенсації на стороні приймача, а також розробку оптимізованих схем управління мережею для мінімізації впливу дисперсії.

Довжина ділянки регенерації може змінюватись в залежності від конкретних характеристик мережі, таких як тип оптичних волокон, потужність сигналу, рівень шумів і спотворень, а також вимог до якості переданих даних.

Довжина ділянки регенерації у системах WDM:

- У системах WDM, де передається кілька незалежних каналів на різних довжинах хвиль, довжина ділянки регенерації зазвичай визначається характеристиками кожного окремого каналу.
- Оскільки канали можуть мати різні рівні дисперсії та втрати сигналу, довжина ділянки регенерації може бути різною для кожного каналу.
- Для збільшення пропускної здатності та ефективності передачі даних у системах WDM можуть використовуватись підсилювачі сигналу EDFA (Erbium-Doped Fiber Amplifier) та дисперсійно-компенсаційні пристрої, які допомагають збільшити довжину ділянки регенерації.

Довжина ділянки регенерації у системах TDM:

- У системах TDM, де доступ до каналу передачі даних надається в певні часові інтервали, довжина ділянки регенерації визначається в основному втратами сигналу та спотвореннями на оптичному волокні.
- Оскільки сигнали можуть зазнавати деградації в міру передачі через оптичне волокно через втрату та дисперсію, довжина ділянки регенерації в системах TDM може бути обмежена, щоб мінімізувати спотворення сигналу та забезпечити надійну передачу даних.
- У системах TDM зазвичай використовуються ретранслятори та підсилювачі сигналу для компенсації втрат та спотворень, а також для збільшення довжини ділянки регенерації.

Загальна довжина ділянки регенерації мережі визначається як сума довжин ділянок регенерації між кожною парою ретрансляторів. Для забезпечення ефективної передачі даних у мережах WDM та TDM важливо правильно вибирати довжину ділянки регенерації з урахуванням специфічних вимог та характеристик мережі.

3 МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ WDM-СИСТЕМ

Типи сервісів, що постійно з'являються, і нові користувацькі додатки створюють все більше навантаження на магістральну транспортну мережу. Це означає, що для транспортування високошвидкісного трафіку потрібна технологія передачі даних, яка, з одного боку, має достатню продуктивність, з іншого надає оператору можливості масштабування мережі без зміни інфраструктури. Цим вимогам задовольняє технологія спектрального мультиплексування WDM.

Перші WDM-системи були двоканальними з передачею на довжинах хвиль 1310 та 1550 нм. Дещо пізніше з'явилися багатоканальні рішення: CWDM – грубе спектральне ущільнення та DWDM – щільне спектральне ущільнення, де назви говорять про щільність розташування інформаційних каналів в оптичному спектрі.

Ефективність WDM-систем визначається низкою факторів [14]:

1. Якість обладнання. Високоякісне обладнання з мінімальними втратами хвилеводів, фільтрів та підсилювачів сприяє ефективній передачі даних через систему WDM.

2. Вибір довжини хвиль. Оптимальний вибір довжин хвиль для кожного каналу дозволяє максимально використовувати доступний спектр і уникати накладання сигналів.

3. Придушення інтерференційних явищ. Мінімізація інтерференції між різними каналами шляхом використання узгоджених фільтрів та методів сигналізації.

4. Потужність сигналу. Збалансоване керування потужністю сигналу в кожному каналі для забезпечення достатньої сигнально-шумової пропускну здатності.

5. Управління завадами. Ефективне керування завадами, такими як дисперсія сигналу, крос-модуляція та несприятливі впливи навколишнього середовища.

6. Протоколи та алгоритми. Використання ефективних протоколів та алгоритмів маршрутизації та управління трафіком для оптимізації використання ресурсів мережі.

7. Система управління мережею. Наявність ефективної системи управління мережею для моніторингу та налаштування параметрів роботи WDM системи.

8. Масштабованість та гнучкість. Можливість легкої розширюваності та конфігурації системи під різні вимоги та умови експлуатації.

Поліпшення цих аспектів може вплинути на підвищення ефективності системи WDM та забезпечити більш надійну передачу даних через оптоволоконні мережі.

3.1 Напрямки удосконалення компонентів WDM-системи

Будемо орієнтуватися на спрощену схему WDM-системи, рисунок 3.1, у якій відображені основні її компоненти [13].

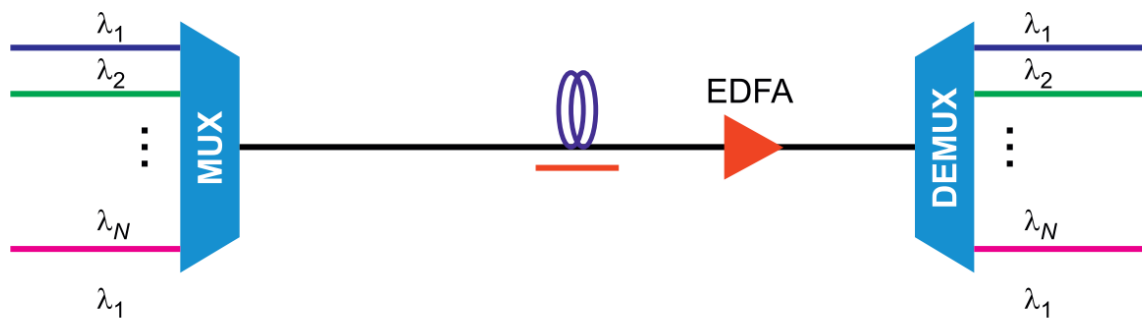


Рисунок 3.1 – Загальний вид WDM-системи з передачею по одному волокну оптичних сигналів на різних довжинах хвиль

Компоненти системи:

- транспондери/мультиплексори, що формують сигнали на різних довжинах хвиль (на схемі не показані, відносять до клієнтського обладнання);

- мультиплексори, що поєднують сигнали з різних волокон на різних довжинах хвиль в одному волокні, та демultipлексори, що розділяють кілька сигналів на різних довжинах хвиль з одного волокна по різних волокнах;
- підсилювачі, що підсилюють багатоканальний сигнал під час його передачі оптичним волокном.

Транспондери/мультиплексори.

Адаптація клієнтських сигналів до мереж DWDM може бути проведена за допомогою блоків транспондерів та мультиплексорів (агрегуючих транспондерів). Ці блоки застосовуються для перетворення несущої довжини хвилі сигналу, що надходить від клієнтського обладнання, до довжин стандартної сітки а також оптичного сигналу, що приходить з лінії, - до несущої довжини клієнтського обладнання, тобто поєднують в собі як передавальну, так і приймальну частину.

Транспондери/мультиплексори здійснюють передачу лінійного сигналу потрібної довжини хвилі в рамках обраного формату спектрального ущільнення. Компоненти у складі передавальної частини (лазери і модулятори), і навіть алгоритми корекції помилок (FEC – Forward Error Correction) забезпечують достатню його стійкість до шумів і спотворень. Використання в блоках транспондерів/мультиплексорів сучасних форматів модуляції дозволяє забезпечувати високу пропускну здатність мережі.

Розширюють функціонал транспондерів та мультиплексорів за рахунок підтримки рішень операторського класу: вживаються заходи щодо збільшення надійності, часу безперервної роботи, зниження часу перезапуску; забезпечується віддалений моніторинг. Сучасні модулі можуть підтримувати програмно-керовану архітектуру мережі SDN (Software Defined Network). Транспондер має число вихідних портів, що дорівнює кількості клієнтських. Залежно від реалізації, він може мати функцію внутрішньої комутації або жорстко пов'язувати вхідні та вихідні порти один з одним попарно.

У разі застосування технології OTN (Optical Transport Network), що працює у зв'язці з DWDM та забезпечує перенесення різноманітного трафіку на оптичний рівень, завдання пристрою зводиться до інкапсуляції клієнтського

сигналу в кадри низького порядку ODU (Optical Data Unit), додавання заголовка для процедури корекції помилок FEC та формування вихідного цифрового кадру. Така процедура називається відображенням, а вихідний цифровий кадр, що модулює оптичну несучу – OTU (Optical Transport Unit).

Очевидно, що застосування мукспондерів дозволяє ефективніше використовувати пропускну спроможність лінії зв'язку, оскільки заощаджує порти на оптичних DWDM-мультиплексорах. Іншою перевагою пристроїв є економія обчислювального ресурсу системи, оскільки контрольна сума FEC (Forward Error Correction) розраховується не для кожного клієнта, а для всього кадру OTU.

Оптичні мультиплексори [10].

Мультиплексори діляться по можливості зміни каналного плану та кількості каналів. У першій класифікації можна виділити 2 групи: фіксовані, коли кожен оптичний канал направляється в заздалегідь жорстко задане волокно, і ROADM (Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer), що перебудовуються – в них можна програмно змінювати розподіл каналів по волокнах. За кількістю каналів виділяють термінальні (багатоканальні), де число каналів $N = 40 - 96$ і мультиплексори введення-виведення OADM (Optical Add-Drop Multiplexer) з кількістю каналів, що вводяться/виводяться від 1 до 16.

Усі транспондери (мукспондери) підключаються до оптичного термінального мультиплексора - пасивного пристрою, що дозволяє об'єднувати сформовані раніше оптичні канали в одне оптичне волокно. На приймальній стороні відбувається демультимплексування оптичного сигналу – операція, обернена до процедури мультиплексування. Саме мультиплексори і демультимплексори є WDM-пристроями в чистому вигляді, оскільки їх параметри визначають частотний план системи зв'язку: щільність розташування каналів, їх кількість, смугу пропускання по кожному каналу.

Фіксовані багатоканальні мультиплексори виготовляються на основі решіток AWG (Array Waveguide Grating), а малоканалні можуть бути реалізовані у вигляді набору тонкоплівкових TFF-фільтрів (Thin Film Filter).

Втрати на канал у мультиплексорах на основі AWG-решіток не залежать від числа каналів і становлять приблизно 5 дБ.

Для формування рівномірного групового сигналу пристрою можуть містити у своєму складі керовані оптичні атенюатори для кожного каналу, що мультиплексується. Крім того, вони можуть бути обладнані вимірниками каналної потужності для віддаленого моніторингу спектра каналів, а також моніторним роз'ємом для підключення вимірювального обладнання без розриву оптичної лінії.

Мультиплексори введення-виведення ROADM [10-14].

Окремого розгляду вимагає група програмно-реконфігурованих мультиплексорів введення-виведення. Якщо фіксовані мультиплексори (OADM) жорстко визначають маршрути каналів, то гнучкість і масштабованість системи може бути забезпечена за допомогою мультиплексора, що реконфігурується - ROADM (Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexer), який програмно змінює розподіл каналів по волокнах, рисунок 3.2.

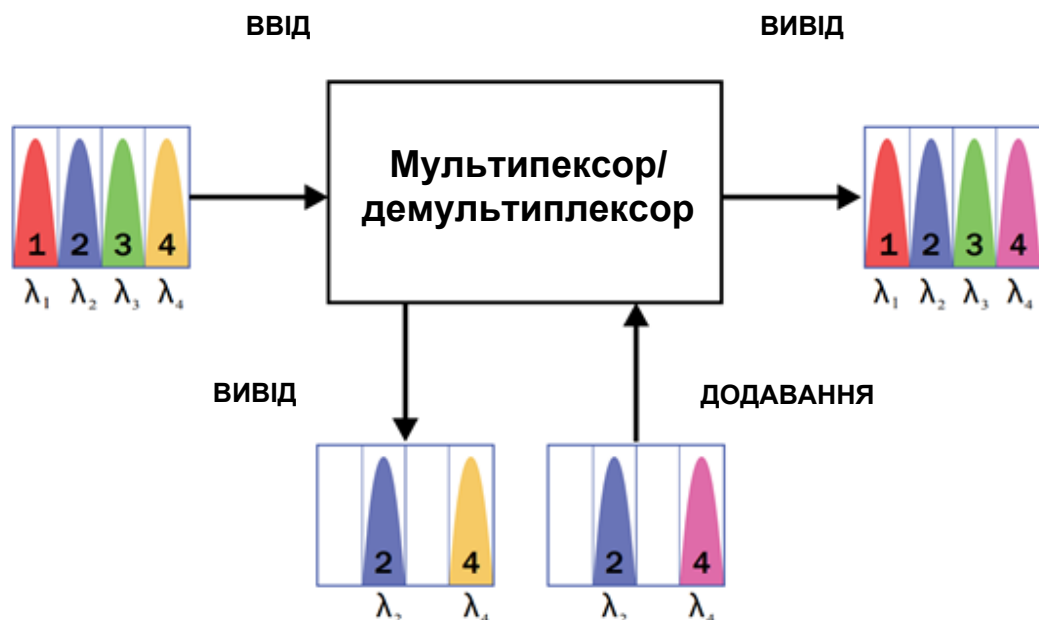


Рисунок 3.2 – Принцип роботи мультиплексора введення-виведення (ROADM), що реконфігурується

Число WSS-матриць (Wavelength Selective Switch), основних компонентів ROADMs, визначає функціональність мультиплексора введення-виведення та кількість доступних напрямків. Матриця WSS направляє довжину хвилі, що прийшла на вхідний порт, на будь-який з N виходів. З появою прецизійних технологій на фотонному рівні з'явилася можливість ефективнішого використання спектрального ресурсу з допомогою високої гранулярності WSS-пристроїв.

Передача сигналу лінією. Оптичне волокно. Оптичний підсилювач.

Передача сформованого групового оптичного сигналу здійснюється по спеціальних оптичних волокнах. Для більшості систем, що використовують технологію DWDM, оптимальними вважаються стандартні одномодові волокна (SSMF – Standard Single Mode Fiber), параметри яких визначаються рекомендацією MCE G.652.

Спеціально для використання у DWDM-системах значної протяжності було розроблено волокно із серцевиною із чистого кварцу (PSCF – Pure Silica Core Fiber, рекомендація G.654D). Типове застосування таких волокон – підводні лінії зв'язку.

Для систем з великою кількістю каналів можуть використовуватись волокна зі збільшеною площею моди (SLA). У таких волокнах зменшуються нелінійні спотворення та збільшується допустима потужність сигналу, що в кінцевому рахунку веде до збільшення дальності безрегенераційної передачі сигналів у волоконно-оптичній лінії зв'язку. Для полегшення монтажу та прокладки може використовуватися волокно зі зниженою чутливістю до втрат на згинах, воно описується рекомендацією G.657.

Оптичне волокно є джерелом загасання, а отже, на лінії необхідно розміщувати спеціальні пристрої – оптичні підсилювачі, що відновлюють рівень оптичного випромінювання, збільшуючи тим самим дальність передачі. Типова відстань між вузлами підсилення – від 60 до 100 км, вона оптимізується для кожної лінії, що проектується.

Для оптичних систем зв'язку застосовують підсилювачі, основу яких можуть бути різні фізичні процеси. Найбільш популярними є підсилювачі на основі волокна, легованого іонами ербію EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier).

Такі пристрої ефективно підсилюють сигнали у С-діапазоні- спектральній області найменшого поглинання кварцового скла 1535...1565 нм. Структура простого однокаскадного підсилювача наведена на рисунку 3.3. Оптичне накачування може відбуватися попутним або зустрічним чином одним або декількома лазерами, що випромінюють на довжинах хвиль 980 або 1480 нм. Іони ербію поглинають енергію накачування, переходячи у збуджений стан. При взаємодії із сигнальним випромінюванням на довжині хвилі 1550 нм відбувається перехід збудженого іона ербію в основний стан, що супроводжується випромінюванням одиничного фотона на довжині хвилі 1550 нм.

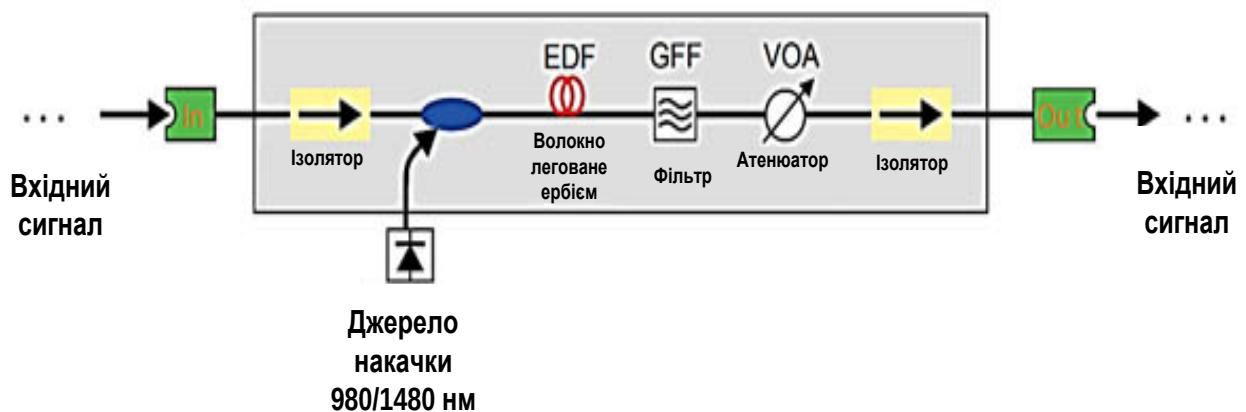


Рисунок 3.3 – Проста схема однокаскадного EDFA-підсилювача

До значних параметрів оптичного волокна відносять коефіцієнт загасання, коефіцієнт дисперсії, коефіцієнт нелінійності.

У сучасних багатоканальних протяжних DWDM-системах застосування однокаскадних підсилювачів є неефективним. Як правило, використовуються багатокаскадні схеми, що забезпечують налаштування необхідного коефіцієнта підсилення за рахунок управління вбудованим атенюатором у VGA-пристроях (Variable Gain Amplifier), вирівнювання спектра групового сигналу за допомогою зладжувальних оптичних фільтрів GFF (Gain Flattening Filter).

Крім EDFA-підсилювачів, у техніці зв'язку можуть використовуватися волоконні підсилювачі, що використовують раманівське розсіювання. Підсилювачі, засновані на ефекті Рамана, можуть бути зосередженими та розподіленими. Якщо зосереджені подібні за своїми експлуатаційними властивостями з EDFA-пристроями, використання розподілених підсилювачів вимагає підвищених заходів безпеки через високі потужності лазера накачування і хороших параметрів волоконно-оптичної лінії.

Підсилювачі Рамана незамінні на великих прольотах (понад 150 км), де немає можливості організації великої кількості проміжних підсилювальних пунктів.

У ранній класифікації оптичних підсилювачів виділялися такі групи за функціональним призначенням: підсилювачі потужності або бустери, що встановлюються відразу після оптичного мультиплексора; лінійні підсилювачі у проміжних точках протяжних ліній зв'язку; попередні підсилювачі на вході демультимплексора для досягнення оптимального рівня сигналу на вході оптичних приймачів. Однак останнім часом виробники DWDM-систем уникають такого поділу, а параметри підсилювача підбираються безпосередньо під лінію, що проектується, з урахуванням неідеальності амплітудно-частотної характеристики всіх активних і пасивних компонентів системи [12].

3.2 Причини виникнення помилок в системах WDM при прийомі оптичного сигналу

Перш ніж розглядати методи збільшення продуктивності DWDM системи та модернізації оптичних транспортних мереж загалом, розглянемо кілька причин виникнення помилок на прийомі. Шуми приймача (або систематичні помилки при перевантаженні) виникають при неоптимальному рівні оптичної потужності на вході транспондера.

Хроматична дисперсія, збільшуючи оптичні імпульси, зменшує екстинкцію (затухання світлової хвилі) та ускладнює їх прийом. Шуми

підсиленого спонтанного випромінювання ASE (Amplified Spontaneous Emission) накопичуються при проходженні груповим сигналом ланцюжка оптичних підсилювачів.

У лініях, що не містять оптичних підсилювачів, як правило, основними причинами помилок є дисперсія, шуми та перевантаження на прийомі. Впровадження оптичних підсилювачів зводить зазначені проблеми з фундаментальних в інженерні: перед подачею сигналу на приймач його підсилюють до оптимального рівня (далеко від меж чутливості та перевантаження). Для компенсації дисперсії лінія обладнується спеціальними пристроями – компенсаторами, що відновлюють тривалість імпульсів перед подачею сигналу на вхід приймальної частини транспондера.

Платою за подолання перших двох причин виникнення помилок є внесення шуму ASE та нелінійних спотворень. Останнє зумовлено іншим характером роботи лінії. Тепер у межах регенераційної секції є кілька (іноді – кілька десятків) підсилювальних секцій, причому на початку кожної з них, де інтенсивність оптичного сигналу досить велика, сигнал піддається дії нелінійних ефектів.

Зумовлене економічними причинами бажання ефективніше використовувати спектр підсилювача і мінімізувати кількість підсилювачів у лінії призводить до появи спектру щільно розташованих каналів великої потужності, що і призводить до розвитку внутрішньоканальних і міжканальних нелінійних ефектів.

Транспондери та мукспондери, що проектуються для роботи в мережах, які не використовують оптичні підсилювачі (як правило, CWDM), оптимізують, покращуючи чутливість та стійкість до дисперсії. Для DWDM рішень це неактуально – там потрібне каналоутворювальне обладнання, стійке до впливу шуму ASE та нелінійних спотворень сигналу. Можна визначити граничні допустимі значення параметрів, що описують вхідний оптичний сигнал, як значення, що дають на виході необхідний коефіцієнт помилок при решта оптимальних параметрах.

Кількість помилок у бітовому потоці даних характеризують величиною BER (Bit Error Rate), що дорівнює відношенню помилково переданих біт до загальної кількості переданих біт. Замовник системи зв'язку обумовлює максимально допустиме значення BER, яке зазвичай становить $10^{-10} \dots -12$.

Для CWDM-обладнання так визначається чутливість приймача (мінімально допустиме значення потужності на оптичному приймачі, при якому неспотворений оптичний сигнал приймається з величиною помилок не вище за певне задане значення) і штрафи по дисперсії. Для DWDM-обладнання основною характеристикою є стійкість до впливу шуму ASE. Величина шуму ASE описується параметром OSNR (Optical Signal-to-Noise Ratio – відношення сигнал/шум), а кожен DWDM-транспондер/мукспондер – його необхідним значенням. Необхідний OSNR – мінімально допустиме значення OSNR, при якому ще можливий прийом сигналу у межах визначеного замовником BER.

3.3 Методи підвищення продуктивності WDM-систем

Визначимо поняття «продуктивність системи зв'язку» як добуток повної швидкості передачі системи зв'язку C на дальність передачі L . Під дальністю в магістральних системах мається на увазі дальність передачі багатопрогової лінії з проміжними підсилювачами без регенерації сигналу. Очевидно, продуктивність DWDM-системи можна нарощувати двома способами: з одного боку, збільшуючи швидкість передачі системи зв'язку, з іншого – домагаючись збільшення граничної дальності передачі [11-13].

Швидкості передачі даних безперервно зростають. Недавно системи 40G (швидкість 40 Гбіт/с) вважалися екзотикою, а зараз – є реальністю в опорних мережах мобільних операторів, датацентрах та в інтернет-провайдерів. Уже стандартизовано та випускається обладнання для передачі даних зі швидкостями 100G, 200G та 400G. Ця динаміка вплинула на розробку нових протоколів передачі інформації (наприклад, IEEE 802.3bs, IEEE 802.3ba, OTU4), нових видів модуляції оптичних сигналів (NRZ-DP-QPSK), введення

обов'язкової перевірки та корекції помилок (FEC) та безлічі інших технічних інновацій. Рисунок 3.4 демонструє шляхи підвищення швидкості передачі даних.

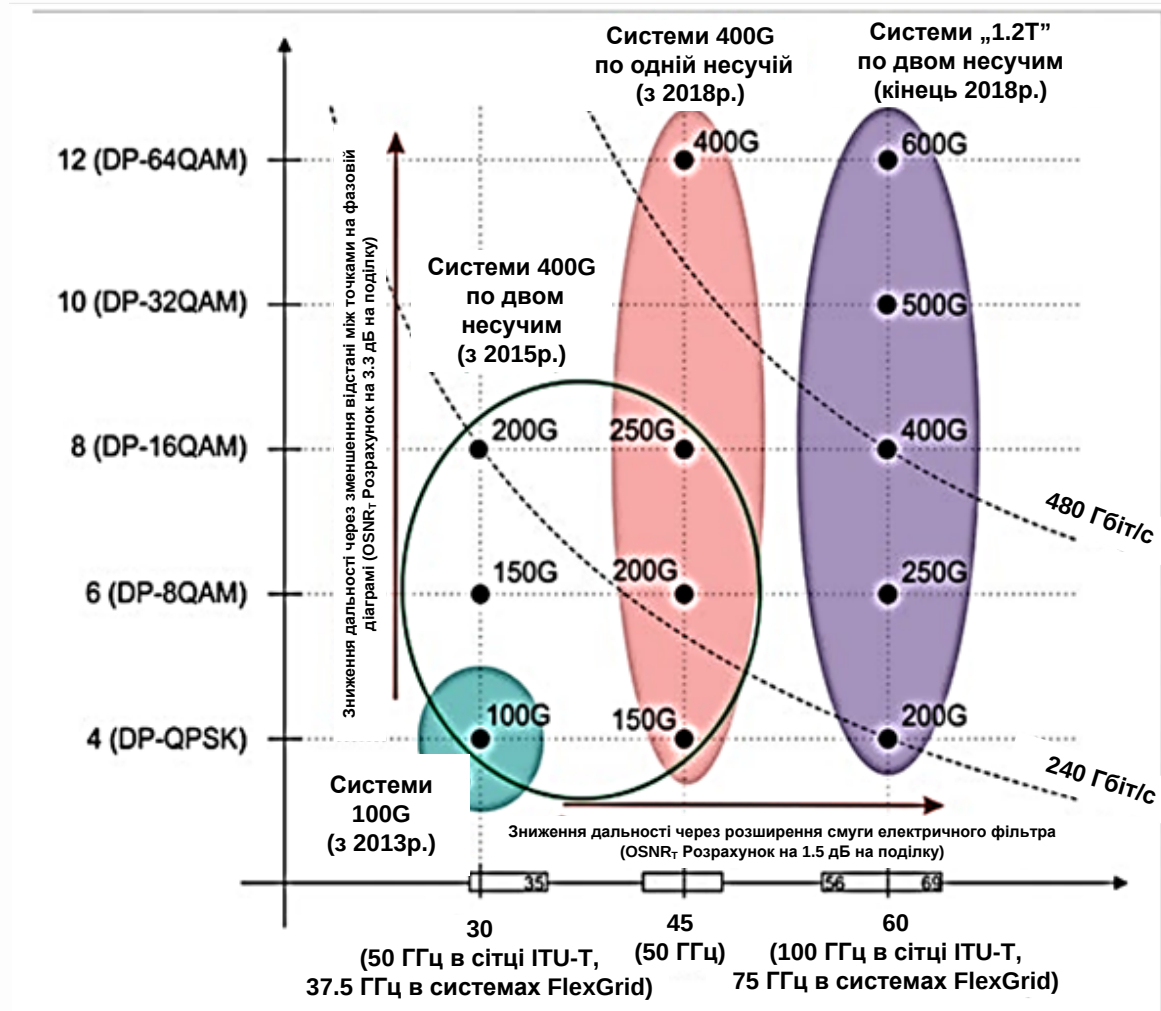


Рисунок 3.4 – Шляхи підвищення швидкості передачі даних

На наведеному рисунку - по горизонталі: символічна швидкість (гігасимволів/с) і оптичний спектральний діапазон, що займає несуща. По вертикалі: символічна ефективність (біт/символ) та формат модуляції. Також звернемо увагу на позначення швидкостей: G – Гбіт/с, T – Тбіт/с, тобто це фактично розмірності. Ці букви записуються поряд з цифрами, які характеризують чисельне значення швидкості передачі інформації.

3.3.1 Збільшення швидкості передачі в системі

Швидкість передачі в системі з однаковими каналами визначається добутком кількості каналів на швидкість у кожному каналі. Швидкість у каналі визначається двома факторами: символною швидкістю та символною ефективністю, рисунок 3.4.

Швидкість передачі даних системи зв'язку (сумарна бітова швидкість V , біт/с = бод) складається із швидкостей передачі даних у кожному каналі (для системи з однаковими каналами це добуток кількості каналів N_{CH} на швидкість V_B [біт/с] у кожному каналі). Максимальна кількість каналів в одній парі волокон встановлена поточним стандартом спектрального ущільнення. Бітова швидкість каналу V_B є добутком символної швидкості V_S (символів/с) на символну ефективність використовуваного формату модуляції E_S (біт/символ). Іншими словами, параметр E_S визначає кількість інформації (число біт даних), що переноситься одним символом, і виражається логарифмом з основою 2 від потужності алгоритму (числа значень, які може набувати символ).

Кількість каналів обмежена доступним спектральним діапазоном (при використанні типових підсилювачів EDFA – приблизно 1530 – 1565 нм, що відповідає 48 каналам 50 ГГц або 96 каналам 50 ГГц. При використанні технологій гнучкого спектру – FlexGrid – кількість каналів може бути й іншою [12].

1. Збільшення символної швидкості V_S означає збільшення частоти роботи модулятора передавача. Граничні значення символної швидкості електричного сигналу визначаються властивостями матеріалів, високочастотної електроніки, модуляторів. Доступне значення з погляду реалізації на стандартній елементній базі знаходиться на рівні 32 Гбод, воно досягнуто в системах 100G. Швидкість 45 Гбод використовується в найсучасніших процесорах 2×200G. Значення 64 Гбод перебувають на етапі лабораторних випробувань. У міру вдосконалення компонентної бази можливе подальше незначне зростання даного параметра, проте суттєвих стрибків у цьому напрямі очікувати не варто.

2. Важливо використати багаторівневі (багатопозиційні) формати модуляції. Історично першими з'явилися амплітудні формати модуляції оптичного випромінювання в модифікаціях NRZ (NonReturn-to-Zero) та RZ (Return-to-Zero), де RZ код більш стійкий до нелінійних спотворень у волокні. Вони забезпечували швидкість передачі до 10 Гбіт/с. Використання амплітудного формату модуляції виявилось проблематичним при швидкостях більше 40 Гбіт/с, оскільки ширина оптичного спектра стає порівнянною з міжканальним інтервалом DWDM-систем. Цей факт, а також нестійкість амплітудно-модульованих сигналів до нелінійних спотворень призвели до переходу на фазові формати модуляції, де інформацію несе в собі фаза оптичного сигналу або різниця фаз сусідніх символів (внаслідок невизначеності фази вхідного символу часто потрібно саме диференціальне кодування).

У сучасних технічних рішеннях використовуються одночасно всі ступені свободи сигналу: амплітуда, фаза та поляризація світлового випромінювання. Найбільш поширеним форматом для 100-гігабітних систем на сьогоднішній день є DP-QPSK (Dual Binary Quadrature Shift Keying), де інформація кодується двома станами поляризації та чотирма значеннями фаз, рисунок 3.5.

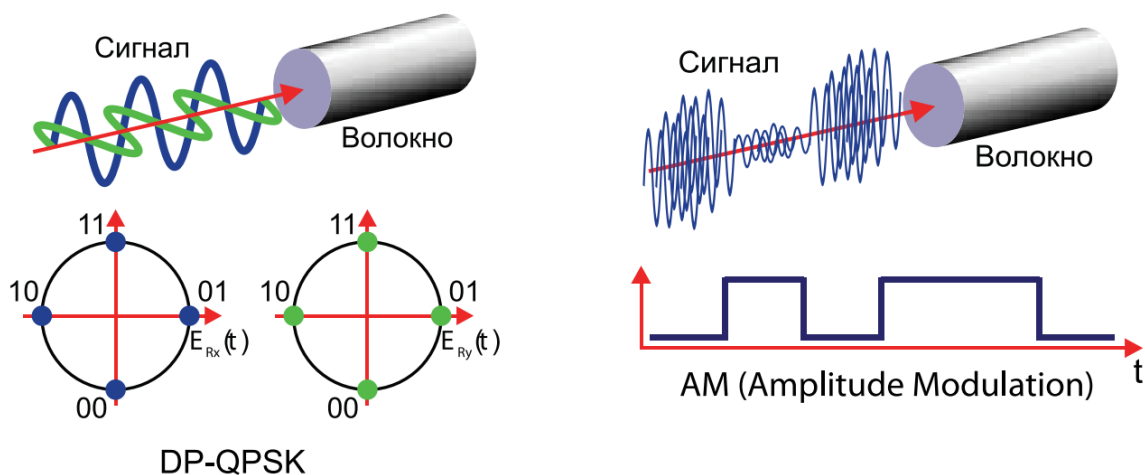


Рисунок 3.5 – Структура сигналу DP-QPSK та AM

На рисунку 3.6 схематично представлений процес формування сигналу в форматі DP-QPSK. Безперервне випромінювання несущої лазером поділяється

на дві ортогональні поляризації, кожна з яких подається на квадратурні модулятори і модулюється інформаційним сигналом з бітовою швидкістю більшою ніж 25 Гбіт/с за рахунок додавання FEC-заголовків. При цьому по одному з плечей інтерферометрів Маха-Цендера, пристроїв в основі квадратурних модуляторів, створюється фазовий зсув на 90 градусів за допомогою керуючої напруги [12].

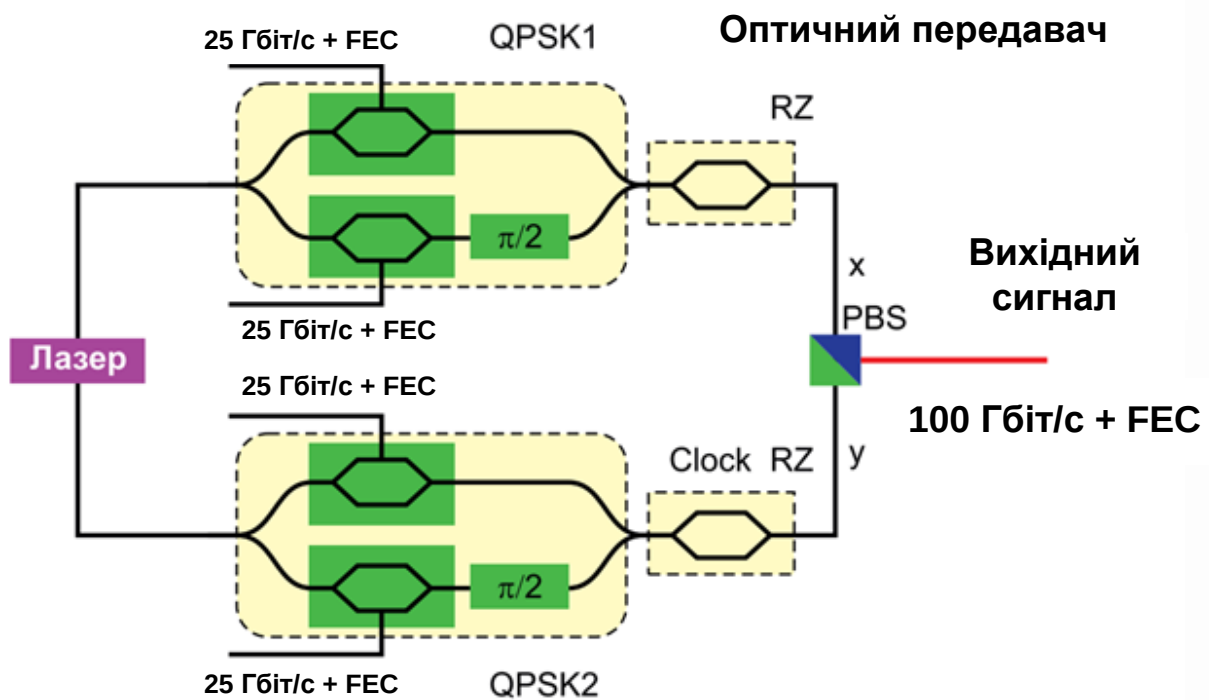


Рисунок 3.6 – Структура передавача DP-QPSK

Таким чином формуються QPSK-сигнали в кожній з поляризацій, які об'єднуються за допомогою поляризаційного сплітера, утворюючи структуру DP-QPSK. Кожен символ формату DP-QPSK переносить 4 біти інформації (по 2 біт/символ у кожній з поляризацій). Перехід на швидкості 200G та 400G задіює також амплітуду світла. Відповідні формати модуляції: DP-16QAM та DP-64QAM суттєво збільшують спектральну ефективність, забезпечуючи велику швидкість передачі даних у звичній смузі 50 ГГц.

У сучасних DWDM-рішеннях із щільним розташуванням оптичних каналів, як правило, вільних міжканальних інтервалів немає, а значить, збільшення спектральної ефективності є єдиним способом збільшити загальну

швидкість передачі даних у системі без розширення спектрального діапазону, що використовується. Це одна з основних причин переходу від амплітудних до складніших фазових когерентних форматів модуляції. Плата за такий виграш – зменшення дальності передачі.

3. Нарощування числа несущих.

Збільшення числа каналів може відбуватися через освоєння нових спектральних діапазонів, що становить складність через обмежену ефективну смугу оптичних підсилювачів.

Інший напрямок – зменшення міжканального інтервалу в освоєному оптичному діапазоні. Воно вимагає переходу на новий стандарт спектрального ущільнення та може призвести до зростання міжканальних завад.

3.3.2 Збільшення дальності передачі

Другий напрямок нарощування продуктивності DWDM-системи – збільшення дальності. Вона, у свою чергу, залежить від безлічі факторів: стійкості обраного транспондера до шумів ASE і нелінійних спотворень, параметрів підсилювачів і волокон, взаємного розташування каналів тощо. Дальність передачі визначається також чутливістю приймача (дБ) – величиною, яка показує, при якому відношенні рівня корисного сигналу до рівня шуму в лінії OSNR (Optical Signal to Noise Ratio) приймач ще здатний безпомилково детектувати сигнал, що надходить.

Іноді потрібно збільшити швидкість передачі із збереженням дальності. Така модернізація лінії може відбуватися шляхом заміни транспондерів на більш досконалі з метою збереження необхідного OSNR [13, 14].

1) Когерентний прийом

Для збереження дальності у поєднанні із спектрально-ефективними форматами модуляції застосовується технологія когерентного прийому. Суть когерентного детектування полягає в змішуванні інформаційного сигналу, що надходить з лінії, з випромінюванням опорного лазера. При цьому відбувається таке перетворення спектра в оптичному діапазоні, що електричний сигнал, що

формується далі у фотоприймачі, містить повну інформацію про вихідний оптичний сигнал.

Структура когерентного приймача зображено рисунку 3.7. За допомогою поляризаційних сплітерів інформаційний сигнал і опорне випромінювання приймального лазера діляться на дві ортогональні компоненти. 90-градусний оптичний змішувач необхідний для змішування поляризаційних складових сигналу з X- та Y-компонентами приймального лазера.

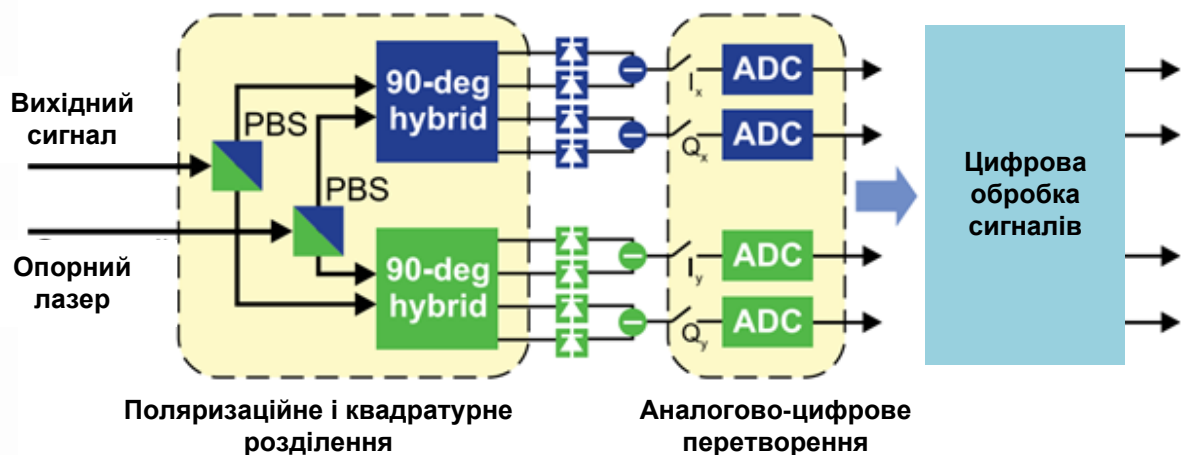


Рисунок 3.7 – Структура когерентного приймача

Частота опорного лазера може перебудовуватися в діапазоні ± 20 МГц відносно несущої передавального лазера. Ширина випромінювання лазерів не перевищує 100 ГГц в сучасних когерентних рішеннях. Чотири пари сигналів із балансних фотодетекторів, що покращують чутливість прийому, надходять на входи аналого-цифрових перетворювачів. Таким чином формується 4 символні потоки.

Найбільш поширені завадостійкі алгоритми для когерентних систем: HD FEC (Hard Decision Forward Error Correction), реалізований на основі каскадних кодів, і SD FEC (Soft Decision Forward Error Correction) на основі «м'якого» прийняття рішення. Оптимальний тип коду вибирається для конкретної лінії та залежить від необхідної дальності, значення накопиченої дисперсії та інших параметрів системи.

Незважаючи на те, що принципи когерентного прийому були давно відомі, їх застосування в оптичному діапазоні довгий час було утруднено через складність і дорожнечу високостабільних вузькосмугових лазерів з необхідністю синхронізації фази і частоти прийнятого сигналу та випромінювання гетеродина. Проблему синхронізації фаз вирішило виникнення потужних технологій обробки сигналів у цифровому вигляді. Так, у блоці DSP (Digital Signal Processing) один із алгоритмів – корекція різниці фаз із застосуванням відновлення несущих. Він виключає необхідність апаратної синхронізації частот та фаз джерел.

2) Цифрова обробка сигналу. Завадостійке кодування.

Сьогодні DSP є невід'ємною частиною когерентного транспондера. Згідно з рисунком 3.7, чотири цифрові потоки з виходів АЦП надходять у блок DSP, де, крім згаданих синхронізації та фазової диверсифікації, реалізовані інші алгоритми компенсації, необхідні для безпомилкового відновлення сигналів.

Перший функціональний блок процесора виключає неточності вхідного інтерфейсу – часову неузгодженість між чотирма компонентами через нерівність оптичних та електричних шляхів усередині когерентного приймача, нерівність їх амплітуд. Далі відбувається перетворення асинхронної частоти дискретизації в частоту 2 відліки на символ. В DSP реалізована компенсація накопиченої в лінії хроматичної дисперсії, що виключає необхідність установки в лінію фізичного компенсатора, що вносить додаткові втрати.

Для отримання чіткої фазової діаграми необхідно мінімізувати відхилення амплітуди від деякого попередньо встановленого середнього значення. Усувається обертання діаграми у фазовій площині. Оцінюється та компенсується фазовий шум, накопичений у тому числі через дію нелінійних ефектів у волокні. Після того, як всі етапи обробки пройдені, визначаються значення прийнятих символів. Останнім кроком є процедура виправлення помилок FEC. Використання надмірного кодування при цифровій обробці багаторівневого сигналу може давати виграш за потрібним OSNR до 9 дБ. До

корисного навантаження у кожному транспондері додається FEC-заголовок, розмір якого визначається типом коду.

3.4 Гнучкість та масштабованість сучасних оптичних систем

Завдання досягнення гнучкості та масштабованості оптичної системи можна умовно розділити на кілька напрямків: модернізація фізичних компонентів системи та організація керуваності мережі на програмному рівні.

3.4.1 Формати модуляції. Суперканали

Поява когерентних рішень для DWDM-систем стала першим кроком у бік підвищення продуктивності. Канали 100G+ забезпечили значне збільшення спектральної ефективності. Однак розвиток когерентних технологій на цьому не зупинився і відкрив нові напрямки розвитку. Сучасні надвеликі інтегральні схеми (CBIC), які застосовуються в блоках транспондерів, дозволяють програмним чином перебудовувати формат модуляції для когерентних каналів, масштабуючи швидкість передачі даних. Такий функціонал дозволяє оптимізувати мережу, вибираючи між дальністю та швидкістю, для кожного оптичного каналу.

Як відомо, перехід на більш високий рівень модуляції неминуче зменшує дальність системи зв'язку. Але високошвидкісні цифрові потоки (200G+) будуть передаватися на великі відстані з використанням не однієї, а кількох піднесущих, тобто із використанням структури суперканалу (суперканал – це набір з декількох оптичних піднесущих, яким можна керувати в оптичному тракті як єдиним). Цей факт, у свою чергу, вимагає переходу DWDM-системи від фіксованої 50 ГГц сітки до гнучкого рішення з дискретністю до 12,5 і навіть 6,25 ГГц. Саме на такій відстані можуть бути встановлені піднесущі, що формують суперканал - єдину керовану структуру з інформаційної точки зору. Когерентні оптичні канали і суперканали з програмованою архітектурою

потребують, щоб архітектура мультиплексорів, що реконфігуруються, ROADM, була змінена на конфігурацію FlexGrid-CDC.

3.4.2 Комутація на фотонному рівні

Після того, як когерентні DWDM-канали, у тому числі суперканали, заповнені трафіком, гнучкий ROADM повинен при необхідності перерозподілити окремі довжини хвиль по необхідних напрямках [9-11].

Нова ідеологія FlexGrid передбачає відхід від фіксованої сітки частот до підвищеної дискретності та доопрацювання класичного ROADM у бік підтримки технології суперканалу з кількома піднесущими, які можуть розташовуватися на відстані до 12,5 ГГц і навіть 6,25 ГГц.

Вище було описано класичну конфігурацію оптичного мультиплексора введення-виведення. Однак використання суперканалів як засобу підвищення пропускної здатності вимагає від лінійних пристроїв гнучкості та масштабованості. Ще більше розширення функціоналу FlexGrid ROADM закладено в аббревіатурі CDC (Colorless, Directionless, Contentionless).

Функція «Colorless» забезпечує відсутність прив'язки довжини хвилі до порту ROADM, тобто можливість вводити та виводити будь-яку довжину хвилі на будь-якому оптичному виході пристрою.

«Directionless» підтримує складання оптичного маршруту від транспондера на будь-який із напрямків ROADM без прив'язки до вхідного та вихідного портів.

"Contentionless" дозволяє наявність на вхідних портах сигналів на однакових довжинах хвиль, що прийшли з різних агрегуючих транспондерів. Така ситуація обробляється на оптичному рівні, розводячи однакові довжини хвиль у різні вихідні порти без змішування. Фізична реалізація CDC Flex ROADM має високу вартість, оскільки вимагає наявності великої кількості матриць оптичної комутації WSS (Wavelength Selective Switch).

Економічна доцільність використання таких вузлів має визначатися для кожної конкретної транспортної системи. Там, де потрібно більш дешеве

рішення і не мається на увазі тотальне програмне керування, можуть бути використані усічені варіанти (C ROADM, CD ROADM). Там, де відсутня зміна бодової швидкості та лінійні сигнали не є суперканалами, не потрібні висока дискретність та Flex-рішення.

Блок ROADM повинен підтримувати команди, що надходять по OSC-каналу від системи управління, що дозволить пристрою бути вузлом програмно-керованої мережі.

3.4.3 Комутація на електронному рівні

Вище розглядалася комутація лише на рівні довжин хвиль у пристрої WSS, де розділення сигналів до цифрових контейнерів немає. Більш складний варіант - реалізація OTN крос-коннекту (OXC). Наявність матриці крос-комутації – стандартна вимога замовників DWDM-обладнання для мереж з складнішою топологією, ніж «точка-точка». OXC є керованою інтегральною схемою, призначення якої - встановлення логічних з'єднань між портами підключених клієнтських і лінійних карт. У термінології OTN для кожного ODU низького порядку програмно призначається часовий інтервал для мультиплексування в певний ODU високого порядку. Побудова логічних з'єднань усередині шасі дозволяє формувати канали будь-якої складності та протяжності на мережі оператора в автоматичному режимі. Додається функція гнучкого резервування як окремих клієнтських каналів, так і магістральних ліній гарячим резервом без необхідності ручної комутації у разі аварій.

Конкретна реалізація крос-комутації визначається підключеними лінійними картами, які формуватимуть вимоги до пропускної спроможності кросматриці, її дискретність, внутрішній протокол.

На сьогоднішній день найбільший інтерес для конвергентних мереж, що поєднують різні типи трафіку, становлять матриці крос-коннекту, що реалізують одночасно комутацію пакетів та комутацію каналів. До такої крос-плати можуть підключатися лінійні карти як з OTN-інтерфейсами, так і з

Ethernet-портами, а комутація відбуватиметься на рівні приватних пакетів усередині пристрою.

3.4.4 Програмно-керовані мережі

Другий напрямок розвитку транспортних оптичних мереж – використання керованості на програмному рівні.

Програмно-визначена мережа SDN (Software Defined Network) – це мережа з реалізованим методом адміністрування для управління послугами, коли площина управління CP (Control Plane) відокремлюється (абстрагується) від нижчої площини даних DP (Data Plane), рисунок 3.8.

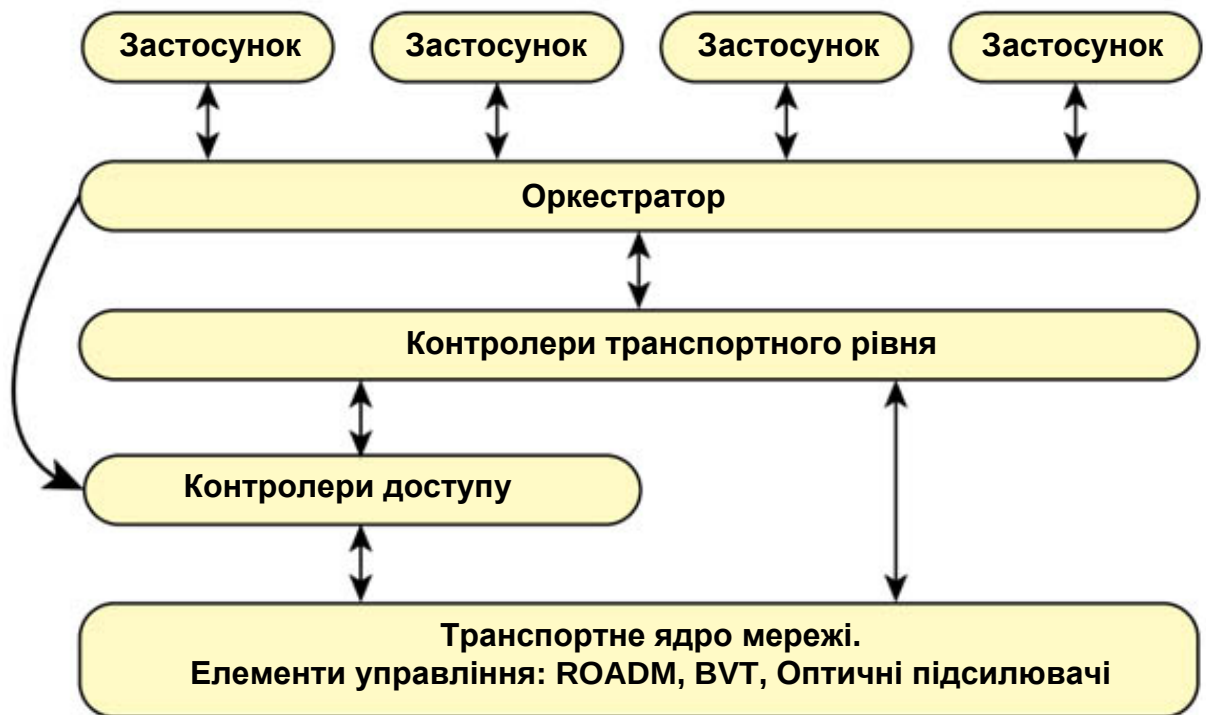


Рисунок 3.8 – Модель програмно-керованої мережі

Крім CP і DP з'являється надбудова у вигляді так званого оркестратора. Оркестратор управляє SDN-контролерами, які відстежують стан різних мережевих ресурсів. Контролери збирають статистику по всіх пристроях мережі та взаємодіють через оркестратор, який оперує спрощеною моделлю нижчих рівнів на основі отриманих даних та виконує надання та оптимізацію

ресурсів з кінця в кінець. Для програм верхнього рівня надаються інтерфейси прикладного програмування (API).

Сьогодні актуальне завдання – інтеграція технології SDN з оптичним обладнанням та пристроями OTN. Перше забезпечить керованість та контрольованість на фізичному рівні, побудову маршрутів передачі трафіку з оптимальними фізичними параметрами, такими як підсилення, формат модуляції, залежність від відстані. Міжнародні стандартизуючі організації, зокрема MSA (Multi Source Agreement), розробляють специфікації взаємодії системи управління з оптичними пристроями.

Другий напрямок, взаємодія площини управління з OTN-пристроями, забезпечить гнучкість побудови маршрутів на рівні OTN. В даному випадку керованими пристроями будуть OTN-транспондери та блоки крос-комутації. На даному етапі в якості програмно-керованих пристроїв розглядаються такі елементи системи: оптичні мультиплексори введення-виведення ROADM в конфігурації CDCFlexGrid, блоки когерентних транспондерів, що перебудовуються, в конфігурації BVT (Bandwidth Variable Transceivers), блоки оптичних підсилювачів з налаштуванням коефіцієнтів підсилення.

3.5 Висновки до розділу

Проаналізовані найбільш важливі вузли, що впливають на показники ефективності системи WDM.

Джерела сигналу (трансмітери), їх якість та точність визначають ефективність передачі даних через систему WDM. Це можуть бути лазерні діоди чи інші оптичні джерела. Мультиплексори, що поєднують різні хвильові канали в єдиний оптоволоконний кабель, повинні забезпечувати мінімальні втрати сигналу та міжканальні завади. Оптичні підсилювачі (ербієві EDFA) відіграють важливу роль у підсиленні сигналу протягом усього шляху передачі. Демультимплексори, що розділяють різні хвильові канали на окремі потоки даних, повинні забезпечувати мінімальні спотворення та міжканальні завади.

Оптичні фільтри та дисперсійні компенсатори використовуються для фільтрації шуму та керування дисперсією сигналу, що допомагає забезпечити чисту передачу даних. Оптичні комутатори та маршрутизатори, що керують маршрутизацією сигналу через різні канали та напрямки, оптимізують використання ресурсів мережі. Якість та чутливість приймачів впливають на ефективність демультимплексування та відновлення сигналу на приймальній стороні. Системи керування та моніторингу - управління та моніторинг параметрів мережі, таких як потужність сигналу, довжина хвилі та шум, є важливими аспектами забезпечення ефективної роботи системи WDM.

Кожен із цих вузлів відіграє ключову роль у забезпеченні ефективної передачі даних через систему WDM, і їх якість та налаштування впливають на загальну продуктивність мережі.

Сучасні досягнення у розробці найважливіших вузлів систем WDM спрямовані на збільшення пропускної спроможності, зниження втрат сигналу, збільшення дальності передачі, підвищення ефективності і надійності роботи. Показано, що в галузі лазерних технологій необхідно створювати більш потужні, стабільні та компактні джерела світла, що буде сприяти збільшенню пропускної здатності та дальності передачі систем WDM. Розвиток оптичних компонентів та технологій їх виготовлення повинен дати більш ефективні пристрої мультимплексування та демультимплексування з меншими втратами, меншими спотвореннями та міжканальними завадами. Необхідне подальше вдосконалення з застосуванням нових матеріалів та конструкцій ефективних оптичних підсилювачів, які дозволять збільшити підсилення сигналу та знизити шумову компоненту. В результаті це підвищить якість передачі даних та розширить дальність передачі – складові ефективності WDM. З урахуванням комплексного підходу подальший розвиток повинні отримати оптичні фільтри, компенсатори, інтегровані оптичні пристрої (мультимплексори/демультимплексори та підсилювачі), цифрова обробка сигналів.

Показано, що ці досягнення допоможуть створити потужніші, ефективніші та надійніші системи WDM.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

Під час дослідження впливу технології WDM на ефективність передачі даних на працівника могли мати вплив такі небезпечні та шкідливі виробничі фактори [15]:

1. Фізичні:

- підвищена запиленість та загазованість повітря робочої зони;
- підвищений рівень шуму на робочому місці;
- підвищена чи понижена вологість повітря;
- підвищений рівень електромагнітного випромінювання;
- підвищена чи понижена іонізація повітря;
- недостатня освітленість робочої зони;
- підвищена яскравість світла; понижена контрастність;
- пряма і відбита блискіть.

2. Психофізіологічні: статичне перевантаження та розумове перевантаження.

Відповідно до наведених факторів здійснюємо розробку заходів щодо безпечного виконання поставленого завдання.

4.1 Технічні рішення щодо безпечного виконання роботи

Вимоги до організації та облаштування робочих місць включають в себе такі параметри: площа, яка має становити не менше 6 квадратних метрів на одне робоче місце, та об'єм, який повинен бути не менше 20 кубічних метрів. Конструкція робочого місця повинна сприяти забезпеченню оптимальної робочої позиції, що дозволяє працівникові виконувати завдання з мінімальним навантаженням на тіло та уникнути перевтоми під час та після робочого процесу. Раціональна робоча поза є важливою для збереження здоров'я працівника, оскільки тривалий час у незручній або напруженій позі може призвести до розвитку захворювань, таких як сколіоз, варикозне розширення

вен, плоскостопість та інші. Дослідження показують, що робота в зігнутому положенні збільшує витрати енергії на 20%, а при значному нахиленні - навіть на 45%, порівняно з прямим положенням тіла [15].

За потреби особливої концентрації уваги під час виконання робіт суміжні робочі місця операторів необхідно відділяти одне від одного перегородками висотою 1,5 - 2 м.

Робочі місця слід розташовувати відносно джерела природного світла (вікон) таким чином, щоб світло падало збоку, переважно зліва. Також робоче місце має відповідати сучасним вимогам ергономіки:

- стіл повинен мати висоту поверхні 680 - 800 мм., ширину 600 - 1400 мм. і глибину 800 - 1000 мм. (такі параметри забезпечують можливість виконання операцій в зоні досяжності працівника);

- робочий стілець робочий стілець має бути підйомно-поворотним, з можливістю регулювання висоти, бажано зі стаціонарними або змінними підлікотниками і напівм'якою нековзкою поверхнею сидіння, що легко чиститься і не електризується;

- екран комп'ютера має розташовуватися на оптимальній відстані від користувача, що становить 600 – 700 мм., але не менше за 600 мм. з урахуванням літерно-цифрових знаків і символів.

Приміщення, де здійснювалося дослідження впливу технології WDM на ефективність передачі даних за безпекою ураження електричним струмом належить до приміщень без підвищеної небезпеки (сухе, мало заповишене, з нормальною температурою повітря, ізолюваними підлогами і малим числом заземлених приладів).

Персональні комп'ютери, периферійні пристрої, інше устаткування (апарати управління, контрольно-вимірювальні прилади, світильники), електропроводи та кабелі за виконанням і ступенем захисту мають апаратуру захисту від струму короткого замикання та інших аварійних режимів. Під час монтажу та експлуатації ліній електромережі необхідно повністю унеможливити виникнення електричного джерела загорання внаслідок

короткого замикання та перевантаження проводів, обмежувати застосування проводів з легкозаймистою ізоляцією і, за можливості, застосовувати негорючу ізоляцію.

Лінія електромережі для живлення персональних комп'ютерів і периферійних пристроїв виконується як окрема групова трипровідна мережа шляхом прокладання фазового, нульового робочого та нульового захисного провідників. Нульовий захисний провідник використовується для заземлення (занулення) електроприймачів.

Усі провідники відповідають номінальним параметрам мережі та навантаження, умовам навколишнього середовища, умовам розподілу провідників, температурному режиму та типам апаратури захисту.

Заземлені конструкції, що знаходяться в приміщеннях, де розміщені робочі місця операторів (батареї опалення, водопровідні труби, кабелі із заземленим відкритим екраном), надійно захищені діелектричними щитками або сітками з метою недопущення потрапляння людини під напругу.

Персональні комп'ютери і периферійні пристрої підключаються до електромережі тільки за допомогою справних штепсельних з'єднань і електророзеток заводського виготовлення. У штепсельних з'єднаннях та електророзетках, крім контактів фазового та нульового робочого провідників, мають бути спеціальні контакти для підключення нульового захисного провідника. Їхня конструкція має бути такою, щоб приєднання нульового захисного провідника відбувалося раніше, ніж приєднання фазового та нульового робочого провідників. Порядок роз'єднання при відключенні має бути зворотним.

4.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії

4.2.1 Мікроклімат

Дослідження впливу технології WDM на ефективність передачі даних за енерговитратами відноситься до категорії I а (енерговитрати до 139Дж/с) [16].

Допустимі параметри мікроклімату для цієї категорії згідно ДСН 3.3.6.042-99 [17] наведені в табл.4.1.

Таблиця 4.1 – Параметри мікроклімату

Період року	Допустимі		
	t, °C	W, %	V, м/с
Теплий	22-28	55	0,1-0,2
Холодний	21-25	75	0,1

Для створення і автоматичної підтримки в приміщенні незалежно від зовнішніх умов допустимих значень температури, вологості, чистоти і швидкості руху повітря обладнані системами опалення та кондиціонування повітря. Систематично проводиться вологе прибирання.

4.2.2 Склад повітря робочої зони

В приміщенні, де здійснюється дослідження впливу технології WDM на ефективність передачі даних, у повітрі можуть перевищувати ГДК такі речовини як вуглекислий газ, пил та озон. Джерелами цих речовин є офісна техніка. Пил потрапляє у приміщення ззовні через відкриті вікна та заноситься на одязі і взутті працівниками.

ГДК шкідливих речовин, які знаходяться в досліджуваному приміщенні, наведені в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – ГДК шкідливих речовин у повітрі

Назва речовини	ГДК, мг/м ³	Середньо добова	Клас небезпечності
	Максимально разова		
Вуглекислий газ	3	1	4
Пил нетоксичний	0,5	0,15	4
Озон	0,16	0,03	4

Рівні позитивних і негативних іонів у повітрі мають відповідати санітарно-гігієнічним нормам (табл. 4.3).

Таблиця 4.3 – Рівні іонізації повітря приміщень при роботі на ПК

Рівні	Кількість іонів в 1 см ³	
	n+	n-
Мінімально необхідні	400	600
Оптимальні	1500-3000	3000-5000
Максимально необхідні	50000	50000

Для підтримки допустимих значень мікроклімату та концентрації позитивних та негативних іонів необхідно передбачати установки або прилади зволоження або штучної іонізації, кондиціювання повітря.

4.2.3 Виробниче освітлення

Приміщення, в яких встановлені персональні комп'ютери, повинні мати природне та штучне освітлення відповідно до ДБН В.2.5-28-2018 [18]. Норми освітленості при штучному освітленні та КПО (для III пояса світлового клімату) при природному та сумісному освітленні зазначені у таблиці 4.4:

Таблиця 4.4 – Норми освітленості в приміщенні

Характеристика зорової роботи	Найменший розмір об'єкта розрізнення	Розряд зорової роботи	Підрозряд зорової роботи	Контраст об'єкта розрізнення з фоном	Характеристика фона	Освітленість, лк		КПО, e_n , %			
						Штучне освітлення		Природне освітлення		Сумісне освітлення	
						Комбіноване	Загальне	Верхнє або верхнє і бокове	Бокове	Верхнє або верхнє і бокове	Бокове
Дуже високої точності	Від 0,15 до 0,3	II	г	великий	світлий	1000	300	7	2,5	4,2	1,5

Штучне освітлення в досліджуваному приміщенні здійснюється системою загального рівномірного освітлення. У разі переважної роботи з документами, допускається застосування системи комбінованого освітлення (крім системи загального освітлення додатково встановлюються світильники місцевого освітлення).

Для забезпечення достатнього освітлення передбачені такі заходи:

- 1) Максимальне використання бічного природного освітлення.
- 2) Систематичне очищення скла від бруду – не рідше двох разів на рік.
- 3) Штучне освітлення в приміщенні забезпечується світильниками типу РСП08×250 (однолампові) з лампами ДРЛ-250.

4.2.4 Виробничий шум

Виробничий шум – це сукупність різних за гучністю і тоном звуків, які виникають у повітряному середовищі. В досліджуваному приміщенні наявний як постійний, так і непостійний шуми. Нормування непостійного шуму, а також орієнтовна оцінка загального рівня постійного шуму здійснюється скоректованим за частотою загальним рівнем звукового тиску – так званим рівнем звуку, який вимірюється в дБА за шкалою «А» шумоміра.

Непостійний шум характеризується еквівалентним рівнем звуку L_A екв., що являє собою середньоквадратичний рівень звуку непостійного шуму, який має такий самий вплив на людину, як і постійний шум.

Для умов виконання роботи допустимі рівні звукового тиску не повинні перевищувати 50 дБА (табл. 4.5).

Таблиця 4.5 – Допустимі рівні звукового тиску і рівні звуку для постійного широкополосного шуму (згідно ДСН 3.3.6.037-99 [18])

Характер робіт	Допустимі рівні звукового тиску (дБ) в стандартизованих октавних смугах зі середньгеометричними частинами (Гц)									Допустимий рівень звуку, дБА
	32	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Виробничі приміщення	86	71	61	54	49	45	42	40	38	50

Рівень шуму в приміщенні не перевищує допустимих значень.

4.2.5 Виробничі випромінювання

Розрізняють природні та штучні джерела електромагнітних полів (ЕМП). У процесі еволюції біосфера постійно перебуває під впливом ЕМП природного походження (природний фон): електричне та магнітне поля Землі, космічні ЕМП, передусім ті, що генеруються Сонцем. У період науково-технічного прогресу людство створило і все ширше використовує штучні джерела ЕМП. У теперішній час ЕМП антропогенного походження значно перевищують природний фон і є тим несприятливим чинником, чий вплив на людину з року в рік зростає.

Значення напруженості електростатичного поля на робочих місцях (як у зоні екрана дисплея, так і на поверхнях обладнання, клавіатури, друкувального пристрою) мають не перевищувати гранично допустимих за ГОСТ 12.1.045-84 [19]. Значення напруженості електромагнітних полів на робочих місцях з ВДТ мають відповідати нормативним значенням (ДСанПіН 3.3.6-2002 [20], ГОСТ 12.1.045-84 [19]). Інтенсивність потоків інфрачервоного випромінювання має не перевищувати допустимих значень відповідно до ГОСТ 12.1.005-88 [21] (табл. 4.6).

Таблиця. 4.6 - Допустимі параметри електромагнітних неіонізуючих випромінювань і електростатистичного поля

Види поля	Допустима поверхнева щільність потоку енергії, Вт/кв.м
Електромагнітне поле оптичного діапазону в ультрафіолетовій частині спектру УФ-С (220 — 280 нм)	0,001
Електромагнітне поле оптичного діапазону в ультрафіолетовій частині спектру УФ-В (280 — 320 нм)	0,01
Електромагнітне поле оптичного діапазону в ультрафіолетовій частині спектру УФ-А (320 — 400 нм)	10,0
Електромагнітне поле оптичного діапазону в видимій частині спектру 400 — 760 нм	10,0
Електромагнітне поле оптичного діапазону в інфрачервоній частині спектру 0,76 — 10,0 мкм	35,0 — 70,0
Напруженість електричного поля відеодисплейного терміналу	20кВ/м

Для дотримання наведених нормативів слід використовувати офісну техніку з сертифікатом якості та дотримуватися встановлених режимів праці та відпочинку з ПК.

4.3 Пожежна безпека

Пожежна безпека – стан об'єкта, при якому з регламентованою ймовірністю відкидається можливість виникнення та розвиток пожежі, і впливу на людей її небезпечних факторів, а також забезпечується захист матеріальних цінностей.

З урахуванням ДСТУ Б В.1.1-36:2016 [22] приміщення, де здійснюється дослідження впливу технології WDM на ефективність передачі даних відноситься до категорії вибухопожежонебезпеки В (тверді горючі та важкогорючі речовини і матеріали, за умови, що приміщення, в яких вони знаходяться, не відносяться до категорій А, Б і питома пожежне навантаження для твердих і рідких легкозаймистих та горючих речовин на окремих ділянках площею не менше 10 м² кожна перевищує 180 МДж/м²).

Клас приміщення і зон з вибухо- і пожежонебезпеки – П-Па (приміщення, у якому знаходяться тверді горючі речовини та матеріали) [23].

4.3.1 Технічні рішення системи запобігання пожежі

Усі заходи системи запобігання пожежі в приміщенні можна поділити на організаційні, технічні, режимні та експлуатаційні.

Організаційні заходи пожежної безпеки передбачають: організацію пожежної охорони на об'єкті, проведення навчань з питань пожежної безпеки (включаючи інструктажі та пожежно-технічні мінімуми), застосування наочних засобів протипожежної пропаганди та агітації, проведення перевірок, оглядів стану пожежної безпеки приміщень, будівель, об'єкта в цілому та ін.

До технічних заходів належать: суворе дотримання правил і норм, визначених чинними нормативними документами при реконструкції

приміщень, будівель та об'єктів, технічному переоснащенні виробництва, експлуатації чи можливому переобладнанні електромереж, опалення, вентиляції, освітлення і т. ін.

Заходи режимного характеру передбачають заборону куріння та застосування відкритого вогню в недозволених місцях, недопущення появи сторонніх осіб у вибухонебезпечних приміщеннях чи об'єктах, регламентацію пожежної безпеки при проведенні вогневих робіт тощо.

Експлуатаційні заходи охоплюють своєчасне проведення профілактичних оглядів, випробувань, ремонтів технологічного та допоміжного устаткування, а також інженерного господарства (електромереж, електроустановок, опалення, вентиляції)

4.3.2 Технічні рішення системи протипожежного захисту

Система протипожежного захисту – це сукупність організаційних заходів а також технічних засобів, спрямованих на запобігання впливу на людей небезпечних чинників пожежі та обмеження матеріальних збитків від неї.

До основних засобів пожежогасіння, що використовуються в приміщеннях такого класу відносять вогнегасники, розміщення яких в приміщеннях позначається встановленим поруч вказівним знаком

Згідно категорії пожежовибухонебезпеки будівлі, класу приміщення і за вибухо- і пожежонебезпекою П-Па та Наказу Міністерства внутрішніх справ України «Про затвердження Правил експлуатації та типових норм належності вогнегасників», в приміщенні має бути встановлено 2 порошкових або вуглекислотних вогнегасники із зарядом речовини від 3 до 5 кг [24].

В цілому приміщення по категорії вибухо- і пожежонебезпечності та ступеню вогнестійкості відповідає нормам, але особливу увагу потрібно звернути на утримання в справному стані засобів протипожежного захисту та своєчасне інформування пожежної охорони про несправність пожежної техніки, впровадження систем протипожежного захисту.

4.4 Висновки до розділу

В результаті виконання цього розділу було опрацьовано такі питання охорони праці, як технічні рішення стосовно: гігієни праці та виробничої санітарії, мікроклімат приміщень, виробниче освітлення, виробничий шум та випромінювання. Також розглянуто пожежна безпека у виробничих приміщеннях та технічні рішення системи запобігання пожежі та систем протипожежного захисту.

ВИСНОВКИ

Технологія WDM є методом мультиплексування, який використовується в оптичних мережах передачі даних для збільшення пропускної спроможності та ефективності передачі.

Мультиплексування за довжиною хвилі - WDM дозволяє одночасну передачу кількох потоків даних по одному оптичному волокну шляхом використання різних довжин хвиль світла. Кожен потік даних (або канал) пов'язаний з унікальною довжиною хвилі. Шляхом використання різних довжин хвиль для різних каналів WDM дозволяє значно збільшити пропускну спроможність оптичного волокна, тобто передавати більший обсяг даних через мережу без збільшення кількості фізичних кабелів або волокон.

Існує два основних варіанти WDM: DWDM та CWDM. DWDM забезпечує більш високу густину каналів і зазвичай використовується для передачі даних на довгій відстані з високою пропускну здатністю. CWDM має більш широкі проміжки між довжинами хвиль і зазвичай використовується для більш коротких відстаней та менш інтенсивних вимог до пропускної спроможності.

WDM забезпечує гнучкість та масштабованість мереж, оскільки нові канали можуть бути легко додані або видалені без необхідності зміни інфраструктури волоконно-оптичної мережі.

Наведені рекомендації щодо вибору джерела випромінювання та оптичного приймача з урахуванням технології WDM. Як правило, джерела випромінювання та приймачі вибираються таким чином, щоб мінімізувати перекриття спектрів сигналів та максимізувати пропускну здатність системи. Це також забезпечує мінімальний вплив крос-модуляції та міжмодових завад.

Виконано розрахунки параметрів багатомодового оптичного волокна зі ступінчатим та градієнтним профілями показника заломлення, а також одномодового оптичного волокна. Розрахована довжина регенераційної ділянки з урахуванням згасання оптичного сигналу та його дисперсії.

Дисперсія оптичного сигналу є одним із ключових параметрів, які можуть впливати на ефективність передачі даних як у системах WDM, так і в системах TDM. Дисперсія оптичного сигналу може призвести до спотворення форми сигналу в кожному каналі WDM, особливо на великих відстанях передачі. Це може призвести до спотворення даних та погіршення якості сигналу. При використанні багатоканальних систем WDM дисперсія може відрізнятися для різних довжин хвиль, що призводить до різного впливу на різні канали. У системах TDM дисперсія може виникати особливо під час передачі даних на довгі відстані. Вона може призвести до розмиття часових слотів та спотворення даних.

У системах WDM, де передається кілька незалежних каналів на різних довжинах хвиль, довжина ділянки регенерації зазвичай визначається характеристиками кожного окремого каналу. Для збільшення пропускної здатності та ефективності передачі даних у системах WDM можуть використовуватись оптичні підсилювачі сигналу EDFA та дисперсійно-компенсаційні пристрої, які допомагають збільшити довжину ділянки регенерації.

У системах TDM, де доступ до каналу передачі даних надається в певні часові інтервали, довжина ділянки регенерації визначається в основному втратами сигналу та спотвореннями на оптичному волокні. Оскільки сигнали можуть зазнавати деградації в міру передачі через оптичне волокно через втрату та дисперсію, довжина ділянки регенерації в системах TDM може бути обмежена, щоб мінімізувати спотворення сигналу та забезпечити надійну передачу даних.

Проаналізовані найбільш важливі вузли, що впливають на показники ефективності системи WDM.

Джерела сигналу (трансмітери), їх якість та точність визначають ефективність передачі даних через систему WDM. Це можуть бути лазерні діоди чи інші оптичні джерела. Мультиплексори, що поєднують різні хвильові канали в єдиний оптоволоконний кабель, повинні забезпечувати мінімальні

втрати сигналу та міжканальні завади. Оптичні підсилювачі (ербієві EDFA) відіграють важливу роль у підсиленні сигналу протягом усього шляху передачі. Демультіплексори, що розділяють різні хвильові канали на окремі потоки даних, повинні забезпечувати мінімальні спотворення та міжканальні завади. Оптичні фільтри та дисперсійні компенсатори використовуються для фільтрації шуму та керування дисперсією сигналу, що допомагає забезпечити чисту передачу даних. Оптичні комутатори та маршрутизатори, що керують маршрутизацією сигналу через різні канали та напрямки, оптимізують використання ресурсів мережі. Якість та чутливість приймачів впливають на ефективність демультіплексування та відновлення сигналу на приймальній стороні. Системи керування та моніторингу - управління та моніторинг параметрів мережі, таких як потужність сигналу, довжина хвилі та шум, є важливими аспектами забезпечення ефективної роботи системи WDM.

Сучасні досягнення у розробці найважливіших вузлів систем WDM спрямовані на збільшення пропускної спроможності, зниження втрат сигналу, збільшення дальності передачі, підвищення ефективності і надійності роботи. Показано, що в галузі лазерних технологій необхідно створювати більш потужні, стабільні та компактні джерела світла, що буде сприяти збільшенню пропускної здатності та дальності передачі систем WDM. Розвиток оптичних компонентів та технологій їх виготовлення повинен дати більш ефективні пристрої мультиплексування та демультіплексування з меншими втратами, меншими спотвореннями та міжканальними завадами. Необхідне подальше вдосконалення з застосуванням нових матеріалів та конструкцій ефективних оптичних підсилювачів, які дозволять збільшити підсилення сигналу та знизити шумову компоненту. Це підвищить якість передачі даних та розширить дальність передачі – складові ефективності WDM.

У роботі також наведено основні заходи з охорони праці та безпеки життєдіяльності.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. В.Б. Каток. Волоконно - оптичні системи зв'язку. – К., Велар, 1999. – 483 с.
2. Основні напрямки стандартизації оптичних кабелів зв'язку / Каток В.Б., Ковтун О.С., Руденко І.Е. – Зв'язок, No 4, 2005. – с. 17-22.
3. Проектування лінійного волоконно – оптичного тракту [Електронний ресурс]: <http://ua-referat.com/>.
4. Бердников О.М., Щирий А.В. Напрямки збільшення швидкостей передачі лінійних трактів телекомунікаційних транспортних систем. XI Міжнародна науково-технічна конференція "Проблеми телекомунікацій" ПТ-2017: Збірник матеріалів конференції. – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. – С. 75...77.
5. Однорог П. М., Михайленко Є. В., Омецінська О. Б. WDM під редакцією Катка В. Б. – Київ, 2005. – 194с.
6. Бердников О. М. Варіанти побудови мінімальної граничної дисперсії в оптичному волокні для багатохвильових систем передачі // Бердников О. М. Позняк А.А. Чижмодій О.Я.// Сучасні інформаційні технології та кібербезпека (Київ 15-16 листопада) 2018. с. 98-99.
7. Стеклов В.К., Беркман Л.Н. Телекомунікаційні мережі. Київ: „Техніка”, 2001
8. Стеклов В.К., Нові інформаційні технології: Транспортні мережі телекомунікацій. Київ: «Техніка» 2004.
9. Корнійчук В.І. Волоконно-оптичні компоненти, системи передачі та мережі / В.І. Корнійчук, П.Д. Мосорін. – Одеса: Друк, 2001. – 363 с.
10. Кожем'яко В.П., Павлов С.В., Мартинюк Т.Б., Лисенко Г.Л. Волоконно-оптичні структури комутації та передачі інформації. Навчальний посібник. - Вінниця: ВДТУ, 2002. - 106 с.
11. Лисенко Г.Л. Аналіз і моделювання роботи оптичних комутаторів для високопродуктивних волоконно-оптичних мереж / Г.Л. Лисенко, С.Є.

Тужанський, О.Ф. Абудайя // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2005 - №2. – С. 69-76.

12. Волоконна та інтегральна оптика. Ч.1. Навчальний посібник / Г. Л. Лисенко. – Вінниця : ВДТУ, 1998. – 127 с.

13. Іоргачов Д. В. Волоконно-оптичні кабелі: теоретичні основи, конструювання і розрахунок, технологія виробництва та експлуатація: монографія / Д. В. Іоргачов, О. В. Бондаренко, О. Ф. Дашенко, А. В. Усов. – Одеса : Астропринт, 2000. – 536 с.

14. ДСТУ ОHSAS 18002:2015. Системи управління гігієною та безпекою праці. Основні принципи виконання вимог ОHSAS 18001:2007 (

15. Гігієнічна класифікація праці (за показниками шкідливості і небезпеки факторів виробничого середовища від 12.08.1986 № 4137-86. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/v4137400-86>

16. ДБН В.2.5-28-2018. Природне і штучне освітлення. – Мінбуд України. – К.: 2006

17. ДСН 3.3.6.037-99 Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. - URL: <http://document.ua/sanitarni-normi-virobnichogo-shumu-ultrazvuku-ta-infrazvuku-nor4878.html>

18. НПАОП 0.00-7.15-18 Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями. URL: http://sop.zp.ua/norm_npaop_0_00-7_15-18_01_ua.php

19. ДСанПіН 3.3.6-2002 Державні санітарні норми і правила при роботі з джерелами електромагнітних полів - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://zakon.nau.ua/doc/?code=z0203-03>

20. НПАОП 0.00-7.11-12. Загальні вимоги стосовно забезпечення роботодавцями охорони праці працівників. URL: <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0226-12>.

21. ДСТУ Б В.1.1-36:2016 Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпек. URL: https://dbn.co.ua/load/normativy/dstu/dstu_b_v_1_1_36/5-1-0-1759.

22. ДБН В.1.1-7:2016 Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги. URL: http://www.poliplast.ua/doc/dbn_v.1.1-7-2002.pdf.

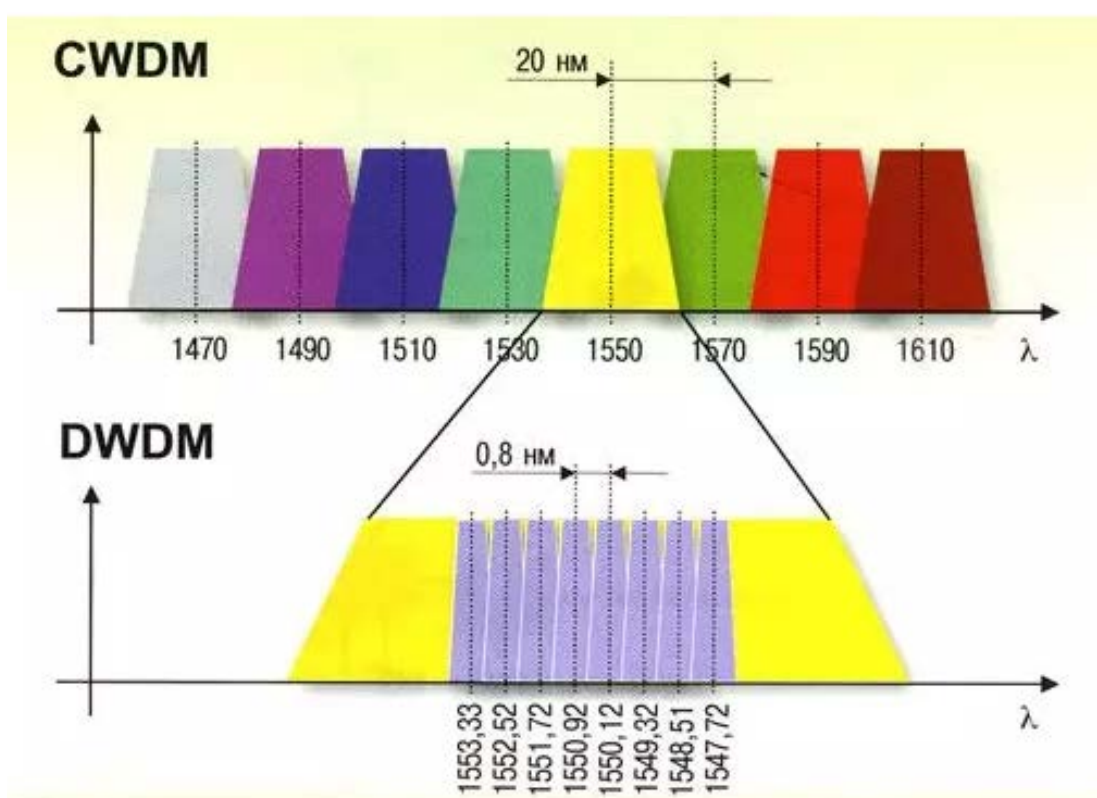
23. Наказ Міністерства внутрішніх справ України «Про затвердження Правил експлуатації та типових норм належності вогнегасників». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0225-18#Text>.

Додаток А
(обов'язковий)

ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА
ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЇ WDM НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ
назва бакалаврської дипломної роботи



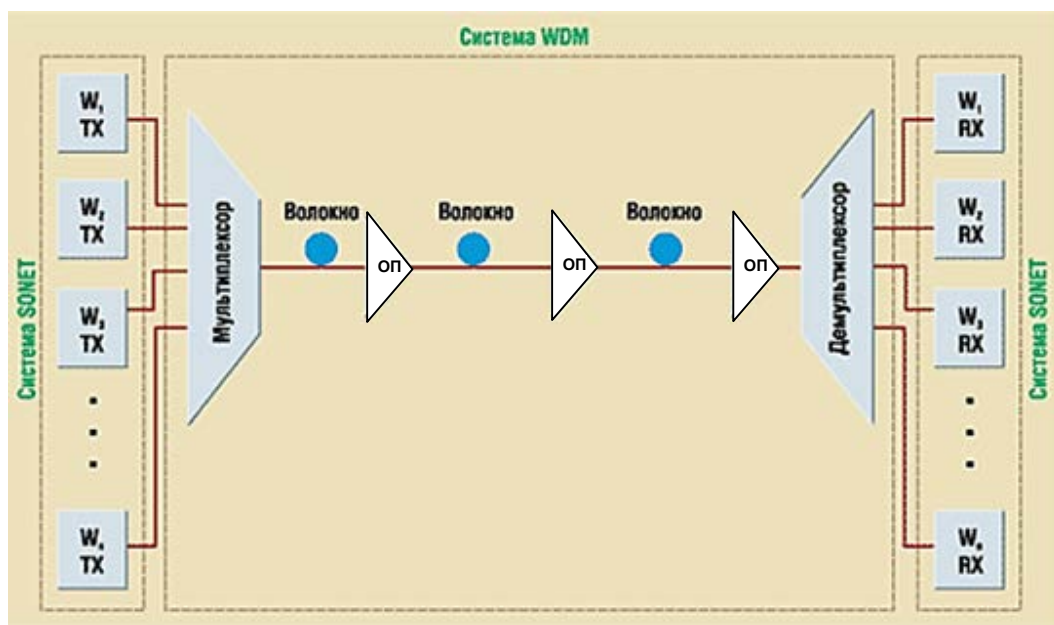
Принцип роботи WDM



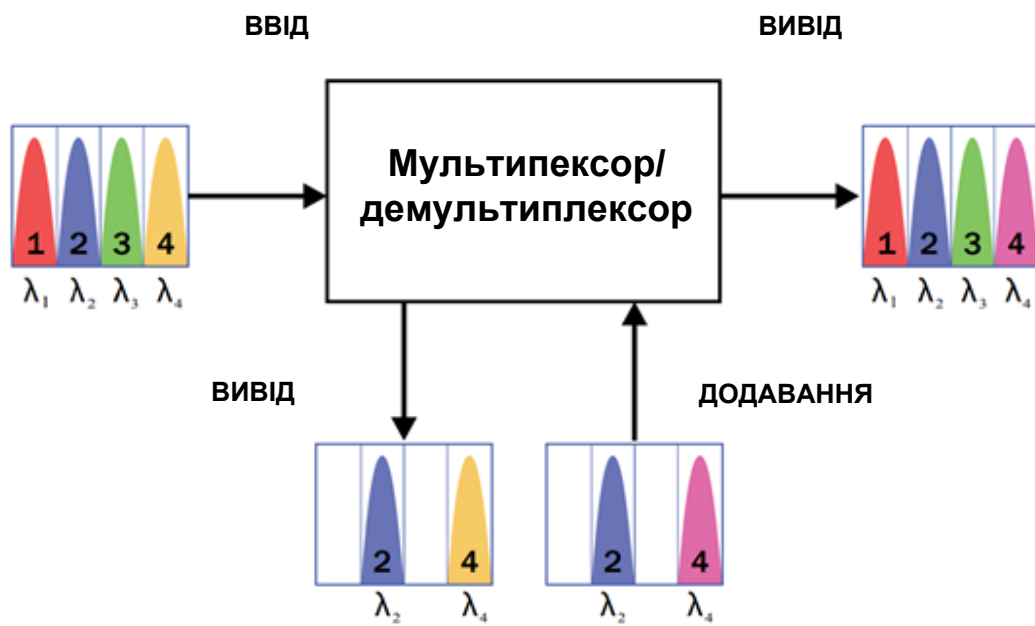
Робочі діапазони технологій CWDM та DWDM

Порівняльні характеристики технологій CWDM та DWDM

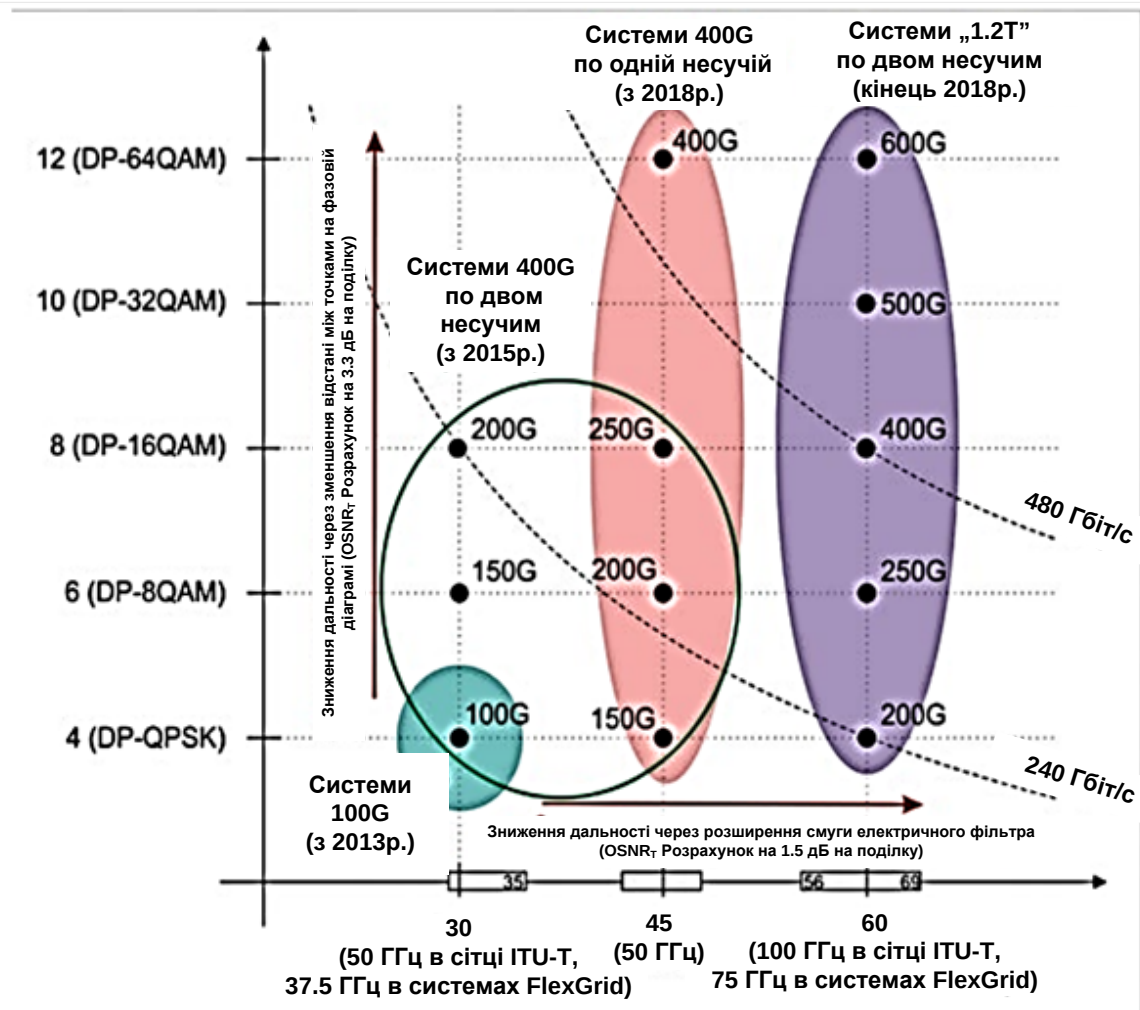
Характеристика	CWDM Грубе мультиплексування з розділенням за довжиною хвилі	DWDM Щільне мультиплексування з розділенням за довжиною хвилі
Хвильовий інтервал	20 нм у цілому	0,8нм/0,4нм/0,2нм/1,6нм
Діапазон хвиль	від 1270 до 1610 нм	від 1525 до 1565 нм (C) від 1570 до 1610 нм (L)
Кількість діапазонів хвиль	18	40/80/160/(до 192)
Форма оптичної модуляції	Лазер без охолодження з електронним налаштуванням	Лазер з охолодженням з налаштуванням за температурою
Ціна	низька	висока
Дальність зв'язку	Коротка (оптичні підсилювачі не підтримуються)	Велика
Структура	проста	Складна (комплекс)
Потужність споживання	низька	висока
Габарити	Малі	Великі
Вимоги до середовища передачі	Низькі	Високі



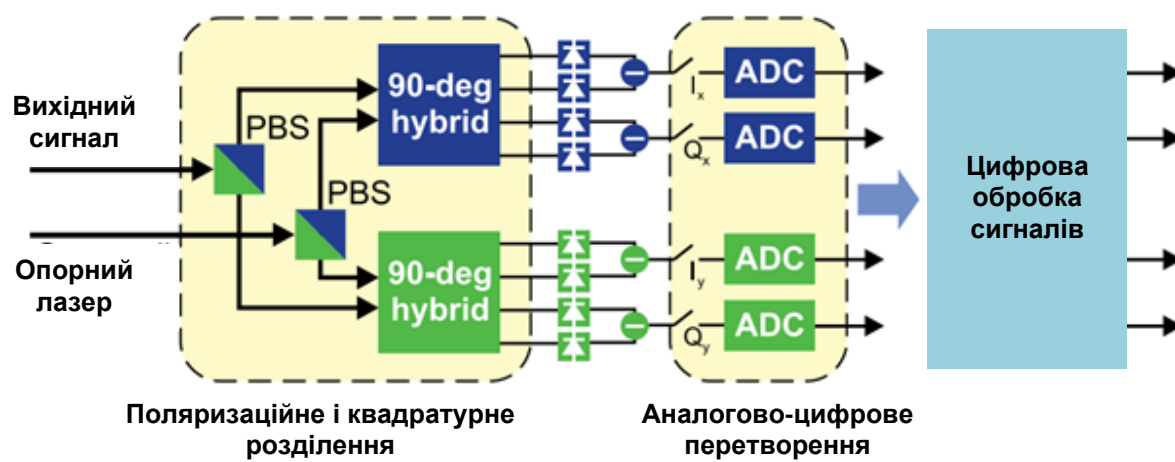
Структурна схема ВОСП з WDM



Принцип роботи мультиплексора
введення-виведення (ROADM), що реконфігурується



Шляхи підвищення швидкості передачі даних



Структура когерентного приймача

Додаток Б

Протокол перевірки кваліфікаційної роботи на наявність текстових запозичень

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ НА НАЯВНІСТЬ ТЕКСТОВИХ ЗАПОЗИЧЕНЬ

Назва роботи: Вплив технології WDM на ефективність передачі даних

Тип роботи: Бакалаврська дипломна робота

(БДР, МКР)

Підрозділ кафедра Інфокомунікаційних систем і технологій, факультет
інформаційних електронних систем

(кафедра, факультет)

Показники звіту подібності Unichesk

Оригінальність 96,16 %

Схожість 3,84 %

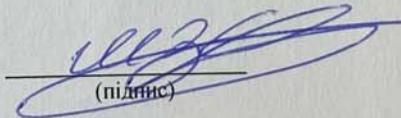
Аналіз звіту подібності (відмітити потрібне):

☒ 1. Запозичення, виявлені у роботі, оформлені коректно і не містять ознак плагіату.

☐ 2. Виявлені у роботі запозичення не мають ознак плагіату, але їх надмірна кількість викликає сумніви щодо цінності роботи і відсутності самостійності її виконання автором. Роботу направити на розгляд експертної комісії кафедри.

☐ 3. Виявлені у роботі запозичення є недобросовісними і мають ознаки плагіату та/або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень.

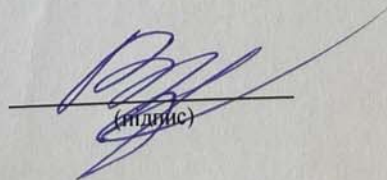
Особа відповідальна за перевірку


(підпис)

Васильківський М.В.
(прізвище, ініціали)

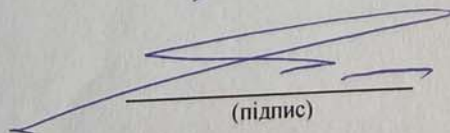
Ознайомлені з повним звітом, який був згенерований системою Unichesk щодо роботи.

Автор роботи


(підпис)

Вікулов М. М.
(прізвище, ініціали)

Керівник роботи


(підпис)

Барась С. Т.
(прізвище, ініціали)